



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO NIEMINEN
RAKENNUSTEN AUTOMAATTISTEN SPRINKLERILAITTEISTO-
JEN LUOTETTAVUUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Mikko Malaska
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
3. tammikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

MIKKO NIEMINEN: Rakennusten automaattisten sprinklerilaitteistojen luotettavuus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 81 sivua, 2 liitesivua

Helmikuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

Avainsanat: sprinklerilaitteisto, luotettavuus, sprinkleri, komponenttipohjainen, systeemipohjainen, vikaantumisen todennäköisyys, paloturvallisuussuunnittelu

Sprinklerilaitteistojen luotettavuudella on tärkeä merkitys osana rakennusten paloturvallisuussuunnittelua. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää sprinklerilaitteiston luotettavuustasoa tyypillisissä rakennuskohteissa ja havainnollistaa sprinklerilaitteiston luotettavuuden merkitystä paloturvallisuussuunnittelussa. Tässä työssä tutkitaan sprinklerilaitteistojen luotettavuutta systeemipohjaisella menetelmällä tapahtumatilastojen avulla sekä komponenttipohjaisella menetelmällä perustuen komponenttien vikaantumistodennäköisyyksiin ja vikapuumalleihin.

Työn kirjallisuustutkimusosan aluksi tarkastellaan sprinklausta osana palosuojauksen erilaisten sprinklerilaitteistojen ja laitteiston komponenttien esittelystä. Tarkastelu jatkuu käymällä läpi sprinklauksen vaikutuksia paloturvallisuuteen ja hyödyntämistä paloturvallisuussuunnittelussa sekä laitteiston luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Kirjallisuustutkimuksen toisessa osassa esitellään sprinklerilaitteistojen luotettavuuden arvioinnin menetelmät ja käydään läpi eri menetelmillä aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Systeemipohjaisten tutkimusten tulokset vaihtelivat paljon johtuen erilaisista lähtöaineistoista ja onnistuneen sammutuksen tulkinnoista. Komponenttipohjaisissa tutkimuksissa vikapuut vaihtelivat hieman, mutta perustuivat pääsääntöisesti laitteistojen kytkentäkaavioihin.

Työn systeemipohjainen tutkimus toteutettiin tutkimalla sprinklerilaitteistojen luotettavuutta tulipaloissa, jotka sattuivat Suomessa vuosina 1996-2016 automaattisella sprinklerilaitteistolla yleissuojatuissa rakennuksissa. Tutkimus tehtiin perustuen pelastuslaitoksen ylläpitämään PRONTO-tietokantaan. Epäselvissä tapauksissa kysyttiin lisätietoja myös rakennusten käyttäjiltä. Sprinklerilaitteistojen luotettavuudeksi arvioitiin 98,1 %.

Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa muodostettiin vikapuumalli sprinklerilaitteistojen tyypillisistä komponenteista. Komponenttien vikaantumistodennäköisyydet kerättiin kirjallisuudesta. Vikaantumistodennäköisyyden arvot poikkesivat paljon toisistaan, joten vikapuulaskennassa hyödynnettiin Monte Carlo –simulointia.

Työn lopuksi sovellettiin komponenttipohjaista tutkimusta puukerrostalo- ja kauppakeskuskohteisiin. Näihin kohteisiin vikapuumallit muodostettiin kohteiden sprinklerilaitteistojen kytkentäkaavioiden pohjalta. Puukerrostalon laitteiston luotettavuudeksi saatiin 99,1 – 99,7 % ja kauppakeskuksen laitteistolle 98,0 – 99,3 %. Saatujen sprinklerilaitteiston luotettavuuden arvojen avulla osoitettiin, millainen merkitys sprinklerilaitteiston luotettavuudella on rakenteiden suunnitteluratkaisuihin.

ABSTRACT

MIKKO NIEMINEN: Operational reliability of automatic sprinkler systems in buildings

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 81 pages, 2 Appendix pages

February 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Mikko Malaska

Keywords: sprinkler system, reliability, sprinkler head, component-based, system-based, failure rate, failure probability, fire safety design

Sprinkler system reliability is an important part of fire safety design in buildings. The main objective of this master's thesis is to determine sprinkler system reliability levels in typical building projects and illustrate the importance of the sprinkler system reliability in fire safety design. The reliability is estimated by system-based approach and component-based approach. The system-based approach estimates the reliability of the entire system directly from past performance in actual fire incidents. The component-based approach builds a reliability estimate for a system from individual component data using a fault tree.

This thesis starts by literature study about sprinkler systems as part of the fire protection. At first, different type of sprinkler systems and system components are introduced. Examination continues by assessing the reliance of sprinklers for fire protection of structures and demonstrating the methods to take sprinkler systems into account in fire safety design and finally introducing factors effecting to sprinkler system reliability. In the second part of the literature study, the two general approaches of quantifying sprinkler system reliability are introduced. In system-based studies, the results of international studies vary a lot due to differences in data and interpretations about successful operation of the system. In component-based approach the fault trees varied a bit but were mostly based on a schematic diagram of the system.

The system-based study of this thesis was made by researching the sprinkler system performance in actual fire incidents happened in Finland in 1996 - 2016. The study was based on rescue services database PRONTO. In unclear incidents, more information was asked from users of the buildings in question. The reliability of sprinkler systems was 98,1 %.

In component-based approach, the fault tree was formed using common components of sprinkler systems. Individual components' failure probabilities per demand were gathered from literature. Monte Carlo –simulation was used because the component data varied a lot between different sources.

At the end of this thesis the component-based approach was applied to high-rise wooden apartment building and to steel structure shopping mall. The fault trees were generated based on the schematic diagrams of the systems. The reliability of the sprinkler system in the high-rise wooden apartment building was 99,1 – 99,7 % and in the steel structure shopping mall 98,0 – 99,3 %. The sprinkler system reliability values were used to demonstrate how the different reliability values effect in structural designing.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratorion palotekniikan tutkimusryhmässä. Diplomityön ohjausryhmään kuuluivat TTY:n palotekniikan tutkimusryhmän lisäksi Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy, Ramboll Finland Oy, Promist Oy, Puutuoteteollisuus ry sekä Teräsrakenneyhdistys ry.

Haluan kiittää kaikkia työtovereitani TTY:n rakennetekniikan yksiköstä sekä kaikkia ohjausryhmän jäseniä: Mikko Malaska ja Anu Aaltonen TTY; Jukka Hietaniemi, Mikko Salminen, Päivi Myllylä, Markku Kauriala ja Jouni Jortikka Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy; Jyri Outinen ja Timo Salmi Ramboll Finland Oy; Kai Laakso Promist Oy; Tomi Toratti Puutuoteteollisuus ry ja Pekka Yrjölä Teräsrakenneyhdistys ry. Erityiskiitokset Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy:n porukalle runsaista materiaaleista ja aktiivisesta ohjauksesta työn aikana sekä Mikko Malaskalle hankkeen koordinoinnista.

Lisäksi haluan kiittää Pelastusopiston Johannes Ketolaa pääsystä PRONTO-aineistoon ja aineiston käsittelyyn liittyvistä ohjeista. Lopuksi haluan kiittää ystäviäni ja perhettäni tuesta diplomityöprosessin ja opiskelujen aikana.

Tampereella, 7.2.2018

Mikko Nieminen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 1.1 | Tutkimuksen tausta..... | 1 |
| 1.2 | Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymys..... | 2 |
| 1.3 | Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne..... | 3 |
| 2. | SPRINKLAUS OSANA PALOSUOJAUSTA..... | 5 |
| 2.1 | Sprinklerilaitteistot | 5 |
| 2.1.1 | Märkäasennus | 6 |
| 2.1.2 | Kuiva-asennus/kuivajatkosasennus | 7 |
| 2.1.3 | Ennakkolaukaisuasennus..... | 8 |
| 2.1.4 | Ryhmälaukaisuasennus | 8 |
| 2.2 | Sprinklerilaitteistojen komponentit | 9 |
| 2.2.1 | Vesilähteet | 9 |
| 2.2.2 | Pumput | 10 |
| 2.2.3 | Sprinklerit | 11 |
| 2.2.4 | Venttiilit | 13 |
| 2.2.5 | Hälytyslaitteet ja hälytykset | 13 |
| 2.2.6 | Putkistot..... | 14 |
| 2.2.7 | Laitteistojen ja komponenttien ylläpito..... | 14 |
| 2.3 | Sprinklauksen vaikutukset paloturvallisuuteen..... | 18 |
| 2.4 | Sprinklauksen hyödyntäminen paloturvallisuussuunnittelussa..... | 21 |
| 2.4.1 | Taulukkomitoitus | 22 |
| 2.4.2 | Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus..... | 24 |
| 2.5 | Sprinklerilaitteiston luotettavuuteen vaikuttavat tekijät | 28 |
| 3. | SPRINKLERILAITTEISTOJEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINNIN MENETELMÄT..... | 30 |
| 3.1 | Systeemipohjaiset tutkimukset..... | 30 |
| 3.2 | Komponenttipohjaiset tutkimukset..... | 31 |
| 3.2.1 | Vikapuun muodostaminen..... | 32 |
| 3.2.2 | Komponenttien toimintavarmuuksien määrittäminen..... | 33 |
| 3.2.3 | Vikapuumallit | 36 |
| 3.3 | Lähtötiedon ja tulosten oikeellisuus ja soveltuvuus | 38 |
| 4. | SPRINKLERILAITTEISTOJEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI..... | 40 |
| 4.1 | Systeemipohjainen tutkimus | 40 |
| 4.1.1 | PRONTO-aineiston valintakriteerit | 40 |
| 4.1.2 | PRONTO-aineistoon perustuva luotettavuusarvio | 41 |
| 4.1.3 | Hallin tutkimusten analyysi..... | 44 |
| 4.2 | Komponenttipohjainen tutkimus | 47 |
| 4.2.1 | Vikapuun valinta..... | 47 |
| 4.2.2 | Lähtöarvojen määrittäminen..... | 48 |
| 4.2.3 | Laskenta..... | 56 |

| | |
|---|----|
| 4.3 Tulosten vertailu ja niihin liittyvät epävarmuudet..... | 58 |
| 5. KOMPONENTTIPOHJAISEN TUTKIMUKSEN SOVELLUS RAKENNUSKOHTEISIIN..... | 60 |
| 5.1 Puukerrostalo..... | 60 |
| 5.1.1 Kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuus..... | 60 |
| 5.1.2 Suunnitteluratkaisu | 61 |
| 5.2 Teräsrakenteinen kauppakeskus | 67 |
| 5.2.1 Kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuus..... | 67 |
| 5.2.2 Suunnitteluratkaisu | 67 |
| 6. YHTEENVETO..... | 72 |
| 6.1 Johtopäätökset | 72 |
| 6.2 Jatkotutkimustarpeet..... | 74 |
| LÄHTEET..... | 76 |

LIITE A: PUUKERROSTALON SPRINKLERILAITTEISTON VIKAPUU

LIITE B: KAUPPAKESKUKSEN SPRINKLERILAITTEISTON VIKAPUU

MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|-------------|---|
| λ | komponentin vikaantumistaajuus |
| τ | sprinklerin laukeamisherkkyyden kerroin |
| a | kolmiojakauman minimiarvo |
| b | kolmiojakauman maksimiarvo |
| c | kolmiojakauman mediaani |
| h | kolmiojakauman korkeus |
| f | syttymistaajuus |
| f' | syttymistaajuustiheys |
| n | tarkasteltavan kohteen palo-osaston ja taulukkomitoituksessa hyväksytyn palo-osaston pinta-alojen suhde |
| p_{alk} | todennäköisyys alkusammutuksen onnistumiselle |
| $p_{pk,cr}$ | todennäköisyys sille, että rakenteiden kannalta kriittinen palokuorma ei ylitä |
| p_{spr} | todennäköisyys sprinklerilaitteiston onnistuneelle toiminnalle |
| p_{uhk} | tarkasteltavan kohteen rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyys |
| p_{vert} | vertailuratkaisun rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyys |
| t | komponentin tarkastusväli |
| t_{vert} | rakenteita uhkaavan palon toistumisaika vertailuratkaisussa |
| v | ilmavirran nopeus |
| x | x-koordinaatti |
| A | pinta-ala |
| P | todennäköisyys |
| R | kantavuus (aika, jonka rakenne kestää standardipaloa sortumatta) |
| d0 | Ei palavia pisaroita tai kappaleita |
| s1 | Savunmuodostus erittäin vähäinen |
| A2 | Tarvike täyttää luokan B vaatimukset SBI - testissä. Tämän lisäksi tarvike ei osallistu palon kehittymiseen täyden palon vaiheessa eikä lisää palokuormaa tai palon kasvua. |
| CDF | Kertymäfunktio |
| HHP | Raskas sprinkleriluokka, tuotanto |
| HHS | Raskas sprinkleriluokka, varastointi |
| LH | Kevyt sprinkleriluokka |
| NFIRS | National Fire Incident Reporting System (USA) |
| OH | Normaali sprinkleriluokka |
| OH1 | Normaali sprinkleriluokka, ryhmä 1 |
| OH2 | Normaali sprinkleriluokka, ryhmä 2 |
| OH3 | Normaali sprinkleriluokka, ryhmä 3 |
| OH4 | Normaali sprinkleriluokka, ryhmä 4 |
| OREDA | The Offshore and Onshore Reliability Data |
| PRONTO | Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto |
| RTI | Response Time Index, sprinklerin laukeamisherkkyyttä kuvaava vasteaika |

1. JOHDANTO

Automaattiset sprinklerilaitteistot ovat yksi tehokkaimmista aktiivisen palosuojauksen keinoista ja siten tärkeä osa rakennusten paloturvallisuussuunnittelun kokonaisuutta. Niiden toiminta vähentää merkittävästi sekä palokuolemia että tulipaloista aiheutuvia aineellisia vahinkoja (Hall 2010). Sprinklerilaitteistojen tulee kuitenkin toimia luotettavasti, jotta niitä voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti paloturvallisuussuunnittelun osana.

Luotettavuudella tarkoitetaan arviota todennäköisyydestä, jolla järjestelmä tai komponentti toimii odotetulla tavalla. Luotettavuus (*reliability*) koostuu useammasta eri osatekijästä. Toimintavarmuus (*operational reliability*) mittaa todennäköisyyttä, jolla järjestelmä tai komponentti toimii tarvittaessa. Toimintatehokkuus (*performance reliability*) puolestaan mittaa todennäköisyyttä, jolla järjestelmän toimiessa se toimii tehokkaasti. Sprinklerilaitteistojen kohdalla toimintavarmuus kuvaa laitteiston komponenttien toimintakuntoa ja toimintatehokkuus laitteiston kykyä suoriutua tyydyttävästi eri palotilanteissa. (Budnick 2001) Luotettavuuden kolmanneksi osatekijäksi voidaan ottaa laitteiston saatavissa olo (*availability*). Saatavissa olo mittaa todennäköisyyttä, että laitteisto on käytettävissä tarvittaessa. Sprinklerilaitteisto voi olla pois käytöstä esimerkiksi laitteiston huollon tai rakennuksessa tehtävän remontin takia. (Marsh 2008) Laitteiston kokonaisluotettavuus kuvaa siis todennäköisyyttä, jolla laitteisto on käytettävissä, komponentit ovat toimintakunnossa ja laitteisto pystyy tehokkaasti sammuttamaan tai rajoittamaan tulipalon.

1.1 Tutkimuksen tausta

Automaattisten sprinklerilaitteistojen luotettavuudesta ja tehokkuudesta on keskusteltu siitä lähtien, kun laitteistoja alettiin kehittää 1800-luvulla. New York State Factory Investigating Commission teki yhden ensimmäisistä sprinklerilaitteistojen luotettavuusarvioista vuonna 1912 julkaistussa raportissa. Sen mukaan sprinklerilaitteistot toimivat 75 – 95 % luotettavuudella. (Frank 2013) Tämän jälkeen aiheesta on julkaistu useita tutkimuksia, joissa on annettu arvioita sprinklerien toimintavarmuustasoista. Näiden tutkimusten perusteella sprinklerilaitteistot ovat verrattain luotettavia, mutta saadut luotettavuusarviot vaihtelevat kuitenkin tutkimusten välillä melko paljon. Sprinklerilaitteistojen toimintaa vaativien tapausten tilastointi vaihtelee paljon eri maiden välillä, ja siten myös luotettavuustutkimusten lähdeaineistojen laatu vaihtelee. Myös tutkimuksiin valittujen sammutuslaitteistojen ja tulipalotapausten kriteerit vaihtelevat, joten eri tutkimuksissa saatujen luotettavuusarvioiden vertailu keskenään on vaikeaa. (Budnick 2001) Kaikissa tutkimuk-

sisä ei ole edes kerrottu kriteerejä aineiston valinnalle, mikä vaikeuttaa vertailua entisestään. Monet tutkimukset ovat myös jo melko vanhoja, joten ne eivät sisällä uusimpia sprinklerteknologioita ja näiden tutkimusten hyödyntäminen uuden sprinklerilaitteiston luotettavuutta arvioitaessa on siten kyseenalaista.

Sprinklerilaitteistojen luotettavuutta tutkitaan tyypillisesti kahdella eri tavalla: komponenttipohjaisesti vikapuiden avulla tai systeemipohjaisesti tapahtumatilastojen avulla. Komponenttipohjaisessa lähestymisessä laitteiston toimintavarmuusarvio muodostetaan laitteiston osana toimivien yksittäisten komponenttien luotettavuusdatan perusteella. Systeemipohjaisessa lähestymisessä taas koko laitteiston toimintavarmuusarvio saadaan suoraan sprinklerilaitteistojen toiminnasta aiemmissa palotilanteissa koottujen tilastojen perusteella. (Frank et al. 2013)

Näihin molempiin lähestymistapoihin liittyvät myös omat haasteensa. Komponenttipohjaisessa arviossa haasteena on ottaa vikapuuhun mukaan kaikki tarvittavat vikaantumistekijät. Sprinklerilaitteiston toimimattomuus palotilanteessa saattaa joissain tapauksissa johtua esimerkiksi siitä, että laitteisto on pois päältä tai tilaan on asennettu vääränlainen laitteisto. Tällaisten tekijöiden huomioiminen vikapuussa on vaikeaa. Yksittäisten komponenttien luotettavuustietoja on myös melko niukasti saatavilla ja eri lähteissä esitetyt arvot vaihtelevat paljon. Sprinklerilaitteiston reagointia vaativia tulipaloja sattuu melko harvoin, joten systeemipohjaisiin tutkimuksiin käytetyissä palotilastoissa on mukana tulipaloja pitkiltä aikajaksoilta, erityyppisissä rakennuksissa ja erilaisilla sprinklerijärjestelmillä varustetuissa kohteissa. Tilastollisen toimintavarmuusarvion soveltuvuus juuri suunniteltavaan kohteeseen on siis kyseenalaista. Tilastoissa on usein mukana myös paloja, joita sprinklerilaitteiston ei voi edes olettaa sammuttavan.

Epävarmuus sprinklerilaitteistojen tehokkuudesta on havaittu olevan rajoittava tekijä oletettuun palonkehitykseen perustuvan suunnittelun kehityksessä. (Frank et al. 2013) Sprinklerilaitteiston toimintavarmuustaso voi vaikuttaa merkittävästi rakenteiden kustannuksiin, kun palosuunnittelu tehdään oletettuun palonkehitykseen perustuvalla mitoitusella. Sprinklerilaitteiston toiminta on silloin yksi tapahtuma tapahtumaketjussa, jonka avulla määritetään tutkittavan vahingon todennäköisyyttä. Tapauksesta riippuen muuttaman prosenttiyksikön ero sprinklerilaitteiston luotettavuudessa voi vaikuttaa suunniteltavan rakenteen kustannuksiin kymmeniä prosentteja.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymys

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää sprinklerilaitteiston luotettavuustasoja rakennuskohteissa käytännön paloturvallisuussuunnittelun tarpeita varten sekä viranomaispäätösten taustatiedoksi. Tavoitteena on myös esittää, mitä asioita tulee ottaa huomioon luotettavuutta määrittäessä ja millaisia epävarmuuksia saatuihin arvoihin liittyy. Lopuksi tavoitteena on osoittaa, millaisia vaikutuksia saadulla sprinklauksen luotettavuusarviolla on

oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa esimerkiksi rakenteiden kustannuksiin ja sallittuihin pintamateriaaleihin.

Tutkimuksen tavoitteiden pohjalta tutkimuksen pääkysymykseksi määrittyy: *Mikä on rakennusten sprinklerilaitteistojen luotettavuustaso tyypillisissä rakennuskohteissa?* Tyypillisillä rakennuskohteilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa puu- ja teräsrakenteisia koontumis- ja liiketiloja sekä työpaikka- ja asuinrakennuksia. Pääkysymyksen lisäksi työssä vastataan seuraaviin alakysymyksiin:

- Mitkä tekijät tulee huomioida sprinklerijärjestelmän vikapuumallissa?
- Millaisilla kriteereillä tulee valita palotilastot, joita voidaan käyttää luotettavuuden arvioinnin tukena?
- Millaiset vaikutukset sprinklauksen luotettavuudella on oletettuun palonkehitykseen perustuvassa mitoituksessa?

Sprinklerilaitteistojen luotettavuustutkimuksissa esiintyy usein vikaantumisten luokitte- luun liittyvät käsitteet turvallinen vikaantuminen (failed-safe) ja vaarallinen vikaantumi- nen (failed-dangerous). Turvallinen vikaantuminen tarkoittaa sprinklerilaitteiston akti- voitumista, vaikka tulipaloa ei ole tapahtunut. Vaarallisessa vikaantumisessa laitteisto ei toimi, vaikka pitäisi. (Budnick 2001) Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan vaaral- lisiin vikaantumisiin.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimuksen alussa tehtiin kirjallisuusselvitys sprinklauksesta osana palosuojausta. Aluksi esitellään erilaisia sprinklerilaitteistoja, laitteistojen komponentteja sekä niiden kunnossapitoa. Tämän osion tiedot on kerätty pääasiassa sprinklerilaitteistojen suunnitte- luun, asennukseen ja kunnossapitoon liittyvistä standardeista ja suunnitteluohjeista. Seu- raavaksi kerrotaan sprinklerilaitteistojen vaikutuksista paloturvallisuuteen. Lähteinä on käytetty palotilastoihin sekä täysimittaisiin palotesteihin perustuvia tutkimuksia. Aineis- toa etsittiin Tampereen teknillisen yliopiston Andor-hakupalvelua sekä yleisistä hakupal- veluista Google Scholaria ja Googlea hyödyntäen. Tämän jälkeen käsitellään sprinklauk- sen hyödyntämistä paloturvallisuussuunnittelussa. Tiedot kerättiin paloturvallisuussuun- nitteluun liittyvistä suunnittelustandardeista ja -ohjeista sekä Palotekninen Insinööritoi- misto Markku Kauriala Oy:n materiaaleista. Toisen luvun viimeisessä osassa on esitelty sprinklerilaitteiston luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Aineisto tähän osioon koottiin keräämällä tutkimustietoa aiheeseen liittyen hyödyntäen samoja hakupalveluita kuin aiemmin.

Kirjallisuusselvitystä jatkettiin keskittyen sprinklerien luotettavuuden arvioinnin mene- telmiin. Selvityksessä kerättiin aiempia tutkimuksia liittyen sprinklerilaitteistojen luotet- tavuuteen. Kolmannessa luvussa esitellään näissä tutkimuksissa käytettyjä systeemipoh-

jaisia ja komponenttipohjaisia menetelmiä. Lisäksi arvioidaan kriittisesti aiempien tutkimusten tuloksia ja niissä käytettyjä lähtöaineistoja. Aineisto kerättiin samoilla hakupalveluilla kuin luvussa kaksi ja lisäksi Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy:n asiantuntija Jukka Hietaniemeltä saatiin paljon materiaalia. Suomenkielistä tutkimustietoa aiheesta on vähän, joten keskeisiksi hakusanoiksi muodostuivat: sprinkler system reliability, sprinkler reliability, fire protection reliability ja sprinkler failure rate.

Sprinklerilaitteistojen luotettavuutta määritettäessä tehtiin systeemipohjainen tutkimus Suomessa vuosina 1996-2016 automaattisella sprinklerilaitteistolla suojatuissa rakennuksissa sattuneista tulipaloista. Tutkimus tehtiin etsimällä pelastuslaitoksen ylläpitämästä PRONTO-tietokannasta tähän tutkimukseen soveltuvat tapaukset. Epäselvistä tapauksista kysyttiin lisätietoja myös rakennusten käyttäjiltä. Aiemmat tilastolliset tutkimukset analysoitiin kriittisesti.

Komponenttipohjainen tutkimus tehtiin vikapuumallin avulla. Eri lähteistä löytyneistä vikaantumistodennäköisyyksistä muodostettiin komponentteittain kolmiojakaumat, joista Monte Carlo –simuloinnilla määritettiin arvot vikapuuhun. Osa komponenttien vikaantumistiedoista oli annettu vikaantumistaajuuksina ja ne muutettiin vikaantumistodennäköisyyksiksi Finanssialan Keskusliiton vuonna 2007 julkaiseman Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laadintaohjeissa esitettyjen komponenttien tarkastusvälien avulla. Vikapuumalliksi valittiin yksinkertainen perusmalli. Rakennuskohteen paloturvallisuussuunnittelua tehtäessä vikapuu tulee muodostaa aina vastaamaan mahdollisimman hyvin kohteen sprinklerilaitteiston kytkentäkaaviota. Riskianalyysia tehtäessä kohteen sprinklerisuunnittelua ei ole yleensä vielä tehty, jolloin myöskään tarkkaa kytkentäkaaviota ei ole saatavilla. Tällöin vikapuu täytyy muodostaa perustuen niihin tietoihin, joita laitteistosta on jo olemassa ja täydentää sitä esimerkiksi vastaavien kohteiden kytkentäkaavioiden perusteella.

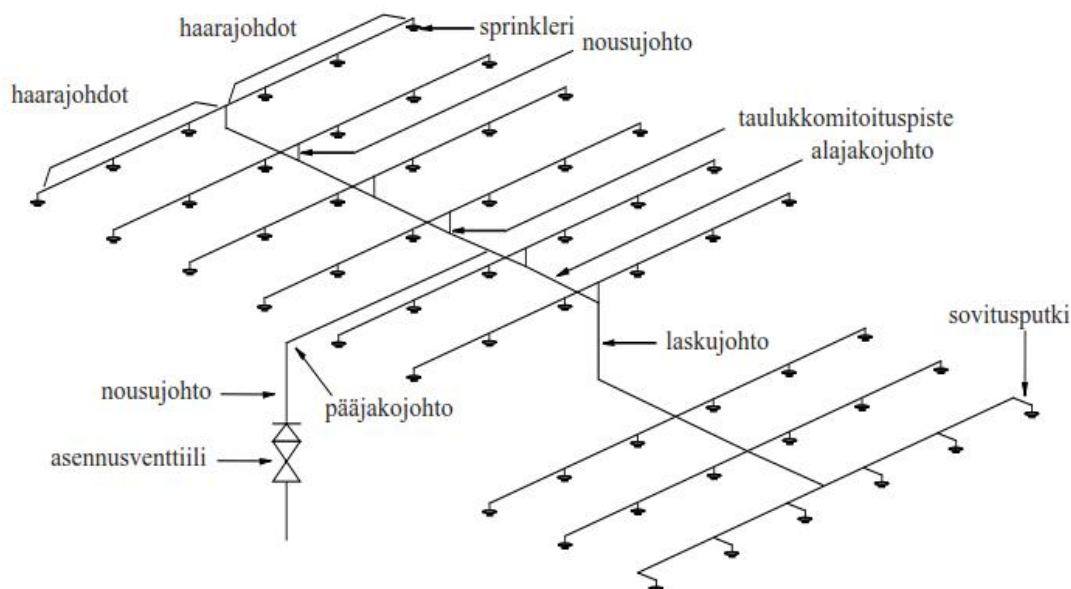
Tutkimuksen lopuksi tehtiin tapaustutkimus, jossa todellisten rakennuskohteiden sprinklerilaitteistojen kytkentäkaavioiden pohjalta muodostettiin vikapuu, jonka avulla arvioitiin laitteiston luotettavuutta. Case-kohteiksi valittiin tyypilliset toiminnallisen palomitoituksen kohteet, puurakenteinen kerrostalo ja teräsrakenteinen ostoskeskus. Tässä osiossa tuotiin esiin myös sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutukset rakenteiden palotekniiseen suunnitteluun.

2. SPRINKLAUS OSANA PALOSUOJAUSTA

Automaattisen sprinklerilaitteiston tehtävänä on ilmaista ja sammuttaa tulipalo vedellä alkuvaiheessaan tai pitää palo hallinnassa, kunnes lopullinen sammutus saadaan suoritetuksi muilla menetelmillä. Sprinklerit laukeavat tietyssä lämpötilassa, levittäen sammutusvettä palavalle alueelle ja palon välittömään läheisyyteen. Hälytysventtiilin läpi virtaava vesi aiheuttaa paloilmoituksen. Vain palon välittömässä läheisyydessä olevat riittävän korkean lämpötilan vaikutuksen alaiseksi joutuneet sprinklerit laukeavat. Sprinklerisuojaus ei tee muita sammutustoimenpiteitä täysin tarpeettomiksi, vaan kohteen paloturvallisuus tulee aina suunnitella kokonaisuutena. (SFS-EN 12845 + A2 2009)

2.1 Sprinklerilaitteistot

Sprinklerilaitteisto koostuu yhdestä tai useammasta vesilähteestä ja yhdestä tai useammasta sprinkleriasennuksesta. Sprinkleriasennukset puolestaan koostuvat asennusventtiilistä laitteineen sekä putkistosta ja sprinklereistä. Sprinklerit asennetaan kattoon sekä tarvittaessa varastotelineistöihin ja hyllyihin sekä muihin erikseen määriteltyihin tiloihin. (CEA 4001:2007)



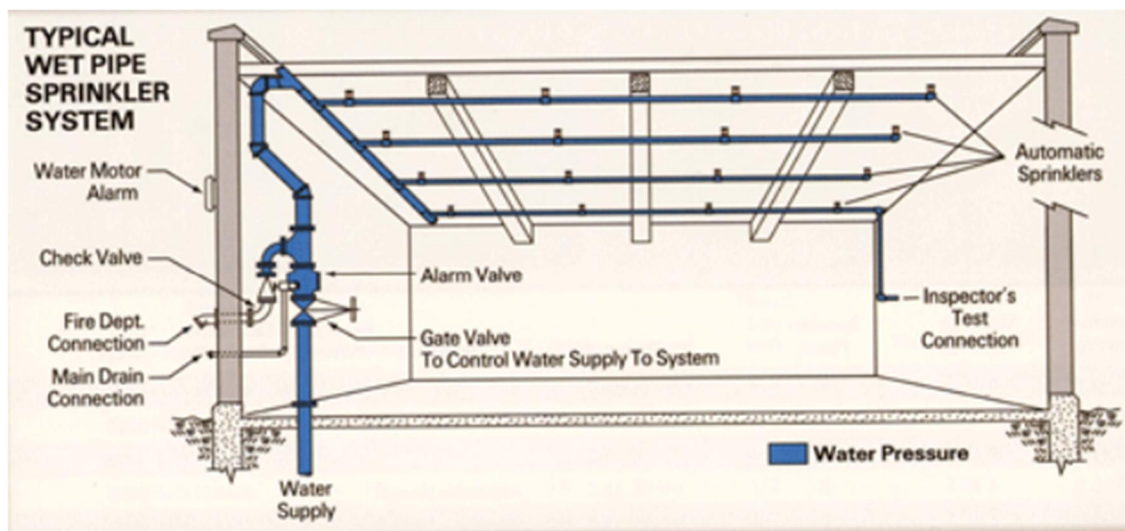
Kuva 1. Sprinkleriasennuksen pääosat. (CEA 4001:2007)

Sprinkleriasennukset voidaan jakaa neljään perustyyppiin: märkäasennus, kuiva-asennus, ennakkolaukaisuasennus ja ryhmälaukaisuventtiiliasennus. Näiden lisäksi on olemassa erilaisia muunnelmia näistä perustyyppien asennuksista, mutta niitä ei esitellä tässä työssä

tarkemmin. Mainittakoon, että näistä muunnelmista kuiva/märkäasennuksen käyttö ei ole sallittua Suomessa (CEA 4001:2007).

2.1.1 Märkäasennus

Märkäasennuksen putkisto on aina täytetty paineenalaisella vedellä. Veden purkautuminen palokohteeseen alkaa välittömästi sprinklerin lauettua. Märkäasennus on kaikista yksinkertaisin, luotettavin ja ylläpitokustannuksiltaan edullisin sprinkleriasennus. Näiden ominaisuuksien takia se on selvästi yleisin sprinkleriasennus. Palon jälkeen märkäasennus on myös helppo ottaa uudelleen käyttöön. Useimmiten uudelleen aktivoimiseen tarvitaan vain avautuneiden sprinklerisuuttimien vaihtaminen uusiin sekä veden päästäminen takaisin putkistoon. Märkäasennusta tulisi kuitenkin käyttää ainoastaan kohteissa, joissa ei ole jäätymisen vaaraa eikä lämpötila ylitä 95 °C (CEA 4001:2007). Haittapuolena märkäasennuksen putkiston rikkoutuessa vuotojen aiheuttamat vesivahingot ovat mahdollisia.

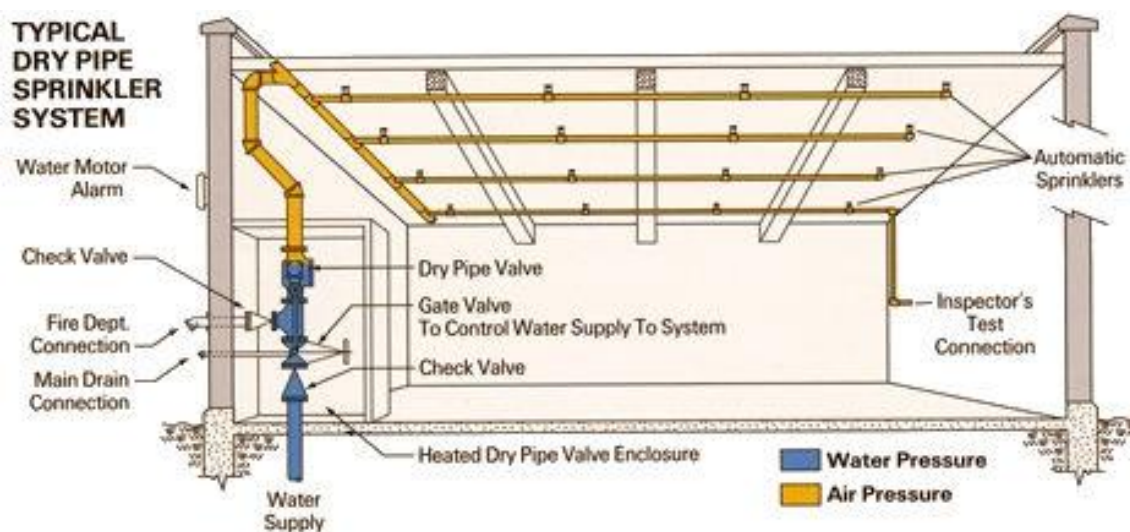


Kuva 2. Tyypillinen märkäasennus. (Triangle Fire Systems 2016)

Kylmissä olosuhteissa märkäasennuksen voi suojata jäätymiseltä sähköisesti lämpökaapelilla, täyttämällä putkisto jäänestonesteellä tai asentamalla kuivajatkosasennus. Jäänestonestettä käytettäessä tulee nesteen jäätymispisteen olla alempi kuin oletettu alin suojatussa tilassa esiintyvä lämpötila. Lämmitysjärjestelmällä varustetut putket on eristettävä palamattomalla aineella. Tällä tavoin suojatut putket on varustettava kaksinkertaisin lämpöelementein putken koko pituudelta siten, että veden lämpötila säilyy vähintään +5 °C asteisena myös toisen elementistä vikaantuessa. Molempia virtapiirejä on ohjattava omalla lämpötilan säätölaitteella ja valvottava sähköisesti. Lämmitysjärjestelmä on varustettava automaattisella virtalähteen ja lämmityselementin säätölaitteen vian valvonalla. (CEA 4001:2007)

2.1.2 Kuiva-asennus/kuivajatkoasennus

Olosuhteissa, joissa putket saattavat jäätymä, on kuiva-asennus vaihtoehto märkäasennukselle. Kuiva-asennus on normaalitilassa täytetty paineistetulla vedellä asennusventtiiliin asti ja paineistetulla ilmalla tai inerttikaasulla asennusventtiilin jälkeen. Asennuksella tulee olla paineilman tai inerttikaasun lähde, jolla putkistossa ylläpidetään paine asennusventtiilin valmistajan suosittelemissa rajoissa. (CEA 4001:2007) Yhden tai useamman sprinklerin aktivoituessa, ilmanpaine putkistossa alenee, jolloin se ei enää pysty vastustamaan vedenpainetta ja venttiili aukeaa epätasaisen paineen johdosta. Paineistettu vesi pääsee virtaamaan vapaasti putkistoon ja purkautumaan aktivoituneista sprinklereistä.



Kuva 3. Tyypillinen kuiva-asennus. (Triangle Fire Systems 2016)

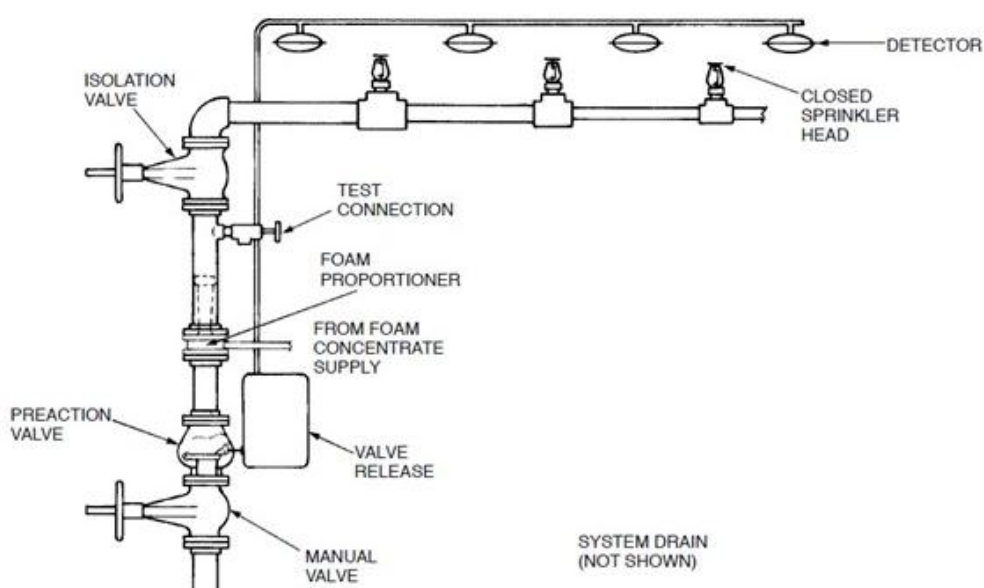
Kuiva-asennus on toimintamekanismiltaan huomattavasti märkäasennusta monimutkaisempi, mikä saattaa tehdä siitä herkemman luotettavuusongelmille. Laitteiston monimutkaisuus tuo mukanaan myös asennus- ja ylläpitokustannuksia. Koska vesi ei ole valmiina putkistossa, sprinklerin aktivoitumisesta kuluu noin minuutti ennen kuin vesi pääsee purkautumaan, jolloin palo on voinut levitä jo huomattavasti laajemmalle alueelle. Kuiva-asennus on myös herkempi korroosioriskeille, sillä ylijäämävesi saattaa aiheuttaa putkistojen haurastumista ja muita ennenaikaisia vikoja, ellei asennus ole normaalitilanteessa täysin kuivana. Kuiva-asennus onkin valittava vain kohteeseen, jossa esiintyy jäätymisen vaaraa tai lämpötila ylittää 95 °C.

Kuivajatkoasennusta voidaan käyttää esimerkiksi lämpimän rakennuksen kylmien varastotilojen suojaamiseen normaalin märkäasennuksen yhteydessä. Märkäasennus ja kuivajatkoasennus erotetaan toisistaan jatkoasennusventtiilillä, jonka jälkeinen asennus toimii vastaavasti kuin kuiva-asennus.

2.1.3 Ennakkolaukaisuasennus

Ennakkolaukaisuasennukset ovat kuiva-asennuksia, joissa asennusventtiiliin voi laukaista erillinen paloilmaisujärjestelmä. Ennakkolaukaisuasennuksia on kahta tyyppiä: vesivahinkojen estojärjestelmä ja nopeutettu kuiva-asennus.

Vesivahinkojen estojärjestelmässä asennusventtiiliin laukaisee erillisestä paloilmaisujärjestelmästä saatava impulssi, mutta ei sprinklerin laukeaminen pelkästään. Tämän tyypin ennakkolaukaisuasennus on tarkoitettu asennettavaksi vain kohteisiin, joissa vikalaukaisun aiheuttama vedenpurkaus tuottaisi kohtuuttoman suurta vahinkoa. Käsikäyttöisen laukaisuventtiilin sijoittamista tarkoituksenmukaiseen paikkaan tulee harkita, jotta hätätilanteessa mahdollistettaisiin asennusventtiilin laukaisu. (CEA 4001:2007)

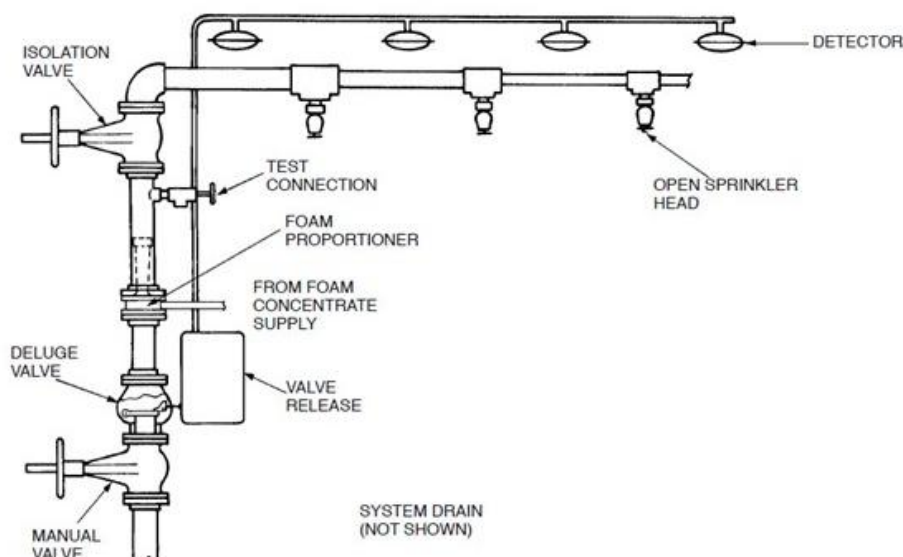


Kuva 4. Tyypillinen ennakkolaukaisuasennus. (Triangle Fire Systems 2016)

Nopeutetussa kuiva-asennuksessa asennusventtiiliin laukaisee joko automaattinen paloilmaisujärjestelmä tai sprinklerin toiminta. Paineen aleneminen putkistossa aiheuttaa asennusventtiilin laukeamisen paloilmaisimien toiminnasta riippumatta. Tämän tyypin ennakkolaukaisuasennus soveltuu kohteisiin, joissa tarvitaan kuiva-asennus, mutta palon oletettu kehitysnopeus on suuri (CEA 4001:2007).

2.1.4 Ryhmälaukaisuasennus

Ryhmälaukaisuasennuksissa asennuksen sprinklerit ovat avoimia eivätkä sisällä lämpö-tunnistinelementtiä. Normaalitilanteessa putkistossa kiertää paineeton ilma avoimien sprinklerien takia. Ryhmälaukaisuventtiili estää paineellisen veden pääsyn putkistoon. Palotilanteessa venttiili avautuu erillisen paloilmaisimen signaalista.



Kuva 5. Tyypillinen ryhmälaukaisuasennus. (Triangle Fire Systems 2016)

Ryhmälaukaisuventtiilin avautuessa vesi pääsee putkistoon ja purkautuu kaikista avosprinklereistä yhtä aikaa. Ryhmälaukaisuasennuksia käytetään kohteissa, joissa on oletettavissa kiihkeästi ja nopeasti leviäviä paloja, ja joissa on siksi toivottavaa laukaista samanaikaisesti tarvittava vesivuo koko palon oletetulle leviämisalueelle. (CEA 4001:2007)

2.2 Sprinklerilaitteistojen komponentit

Sprinklerilaitteistoihin kuuluvat sprinkleriasennusten lisäksi vesilähteet ja niihin liittyvät pumput. Sprinkleriasennukset koostuvat sprinklereistä, venttiileistä, hälytysjärjestelmästä ja putkistosta. Seuraavaksi esitellään tarkemmin näitä sprinklerilaitteistojen komponentteja. Komponenttien vaatimusten lähteenä on käytetty Sprinklerilaitteistojen suunnittelu- ja asentamisohjetta CEA 4001: 2007 - 06 (fi).

2.2.1 Vesilähteet

Vesilähde on järjestely, joka kykenee automaattisesti syöttämään sprinklerilaitteistoon vaaditut virtaamat vaadituilla paineilla. Normaalissa sprinkleriluokassa (OH) vesilähteen minimivesitilavuuden tulee riittää 60 minuutin toiminta-aikaan. Vesilähteet eivät saa altistua pakkasolosuhteille, kuivuudelle, tulville tai muille vesilähteen toimintakykyä uhkaaville tai virtaamaa tai toiminta-aikaa rajoittaville olosuhteille. Jokaisella vesilähteellä tulee olla vähintään yksi kiinteästi asennettu virtaaman ja paineen mittalaite. Useamman vesilähteen käyttö luonnollisesti parantaa sprinklerilaitteiston luotettavuutta.

Sprinklerilaitteiston vesilähteenä voi olla yksi tai useampi seuraavista vaihtoehdoista: yleinen vesijohdot, vesisäiliö, ehtymätön vesilähde tai painesäiliö. Yleisen vesijohdon tulee täyttää paineeseen, virtaamaan ja vedentulon riittävyys nähdessä sille asetettavat

vaatimukset. Yleisen vesijohdon ollessa sprinklerilaitteiston ainoa vesilähde, tulee se varustaa pikaliittimillä, joista palokunta pystyy omilla pumpuillaan syöttämään vettä laitteistoon. Jos yleisestä vesijohdosta saadaan riittävä virtaama, mutta paine on riittämätön, tulee siihen asentaa yksi tai useampi paineenkorotuspumppu. Yleinen vesijohto on kustannuksiltaan halvin ratkaisu, kustannuksia aiheutuu liittymämaksusta ja vuosimaksusta (RT 63-10990 2010).

Vesisäiliötä käytettäessä tulee valita yksi tai useampia seuraavista: pumpun imusäiliö, yläsäiliö/tornisäiliö tai allas. Vesisäiliö tulee varustaa automaattisella vedenpinnan säätölaitteella ja laitteella, joka antaa hälytyksen vesimäärän alittaessa 90% vaadittavasta vesimäärästä ja ylittäessä pinnankorkeuden säätölaitteelle asetetun rajan. Jokaiselle laitteistolle on määriteltävä vähimmäisvesimäärä, joka tulee saada joko täyden tilavuuden säiliöstä, jonka tehollinen tilavuus on vähintään sama kuin määriteltävä vähimmäisvesimäärä tai vähennetyn tilavuuden säiliöstä, jossa vähimmäisvesimäärä saadaan säiliön tehollisen tilavuuden ja automaattisen täytön summana.

Ehtymättömiksi vesilähteiksi luokitellaan joet, kanavat ja järvet, joiden voidaan katsoa olevan tilavuus ja vallitsevat sääolosuhteet huomioiden käytännössä ehtymättömiä. Luonnon vesilähteen käyttöä suunniteltaessa tulee selvittää vedenpinnan vaihtelut ja paikkakunnalla oletettava veden jäätymissyvyys. Lisäksi on selvitettävä veden ja pohjan laatu sekä veden syvyys.

Painesäiliöllä tarkoitetaan ilmalla paineistettua vesisäiliötä, jossa ilmamäärä ja paine riittävät purkamaan koko vesimäärän vaaditulla paineella sprinklerilaitteistoon. Painesäiliö on varattava yksinomaan sprinklerilaitteiston käyttöön. Säiliön tulee rakenteeseen ja sijaintiin nähden täyttää paineastioista annetut viralliset määräykset ja se tulee tarkastaa ja huoltaa paineastioista annettujen asetusten mukaisesti.

2.2.2 Pumput

Pumppujen käyttövoimana tulee olla sähkö- tai dieselmoottori. Kahden pumpun asennuksissa kummankin pumpun tulee yksinään kyetä syöttämään vaaditut virtaamat vaaditulla paineella. Kolmen pumpun asennuksessa jokaisen pumpun tulee kyetä syöttämään puolet vaaditusta virtaamasta vaaditulla paineella. Vain yksi pumpuista saa olla sähkömoottorikäyttöinen. Dieselmoottorikäyttöisellä sprinkleripumpulla varmistetaan sprinkleriveden saanti myös silloin, kun sähköverkosta ei saada virtaa.

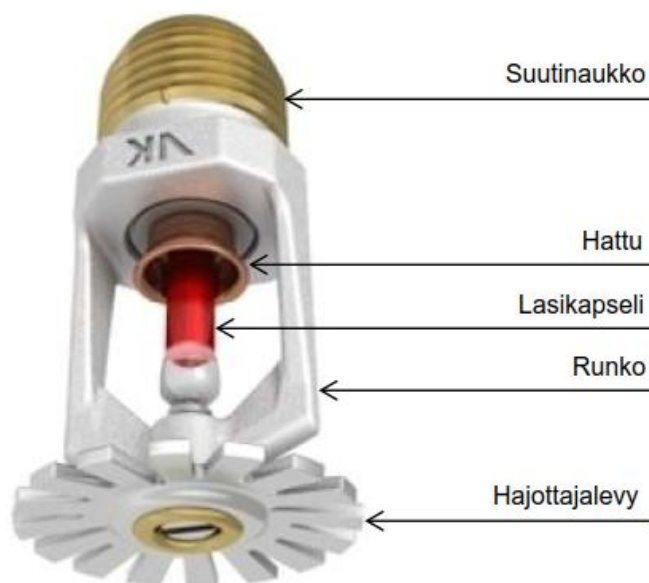
Pumppuyksikön tulee käynnistyä automaattisesti ennen kuin paine runkojohdossa laskee 20 % suljetun pumpun paineesta. Kahden pumpun asennuksessa tulee toisen pumpun käynnistyä ennen kuin paine on laskenut 40 % suljetun pumpun paineesta. Pumpun käynnistyttyä tulee sen toimia, kunnes se pysäytetään käsin. Jos toinen pumpuista on sähkökäyttöinen, tulee sen käynnistyä ensin.

Sähkömoottorikäyttöisillä pumpuilla sähkönsyöttöjärjestelmän tulee olla käytettävissä kaikkina aikoina ja sähkönsyöttö pumpun ohjauskeskukseen on varattava pelkästään pumpun käyttöä varten ja sen tulee olla erillinen kaikista muista kulutuspisteistä. Pumpun tulee olla täydessä toimintakunnossa 15 sekunnin sisällä käynnistyksestä.

Dieselmoottorin tulee kestää jatkuvaa käyttöä täydellä kuormalla paikalleen asennettuna standardin ISO 3046-1:1986 mukaisesti määritetyllä teholla. Pumpulla tulee olla toimintavalmius täydellä teholla 15 sekunnin sisällä käynnistysimpulssista. Pumppuyksikön automaattinen käynnistys ei saa olla riippuvainen muista energianlähteistä kuin itse moottorista ja sen akuista.

2.2.3 Sprinklerit

Sprinklerin komponentteja ovat runko, lämpöelementti, hattu, suutinaukko ja hajottajalevy. Runko pitää sprinklerin muita komponentteja paikallaan ja kiinnittyy yläpäästään suutinaukkoon. Lämpöelementti kiinnittyy runkoon ja pitää hattua paikallaan, kunnes vapauttaa sen kriittisen aktivoitumislämpötilan ylittyessä. Lämpöelementti voi olla joko lasikapseli tai metallinen sulakelukko. Lasikapselin sisällä on nestettä ja pieni ilmakupla. Lämpötilan noustessa neste lämpenee, laajenee ja rikkoo lasikapselin. Lasikapselin koko ja paksuus sekä ilmakuplan koko määrittävät sprinklerin toimintalämpötilan. Metallisessa sulakelukossa metalliset yhdyssiteet on juotettu yhteen, ja kun juote sulaa, yhdyssiteet vapauttavat hatun putoamaan pois paikaltaan. Suutinaukon kautta vesi pääsee virtaamaan putkistosta sprinkleriin. Suutinaukon koko määrittää sprinkleristä vapautuvan vesimäärän. Metallinen hattu toimii suutinaukon vesitiiviinä tukkeena estäen veden virtaamisen ennen kuin tarvitaan. Kun vesi pääsee virtaamaan suutinaukosta, se kohtaa hajottajalevyn, joka luo vesisuihkun suojattavalle alueelle. Hajottajalevy hajottaa vesivirran pienempiin pisaroihin paremman sammutustuloksen saavuttamiseksi. (Maurice Jones Jr. 2008)



Kuva 6. Sprinklerin perusosat. (Perustuu lähteeseen Viking 2018)

Markkinoilla on tuhansia erilaisia sprinklereitä, joita voidaan jaotella moniin erilaisiin kategorioihin ja alakategorioihin. Sprinklereitä voidaan jaotella esimerkiksi vesijakautuman, asennon tai laukeamisherkkyyden mukaan. Vesijakautuman mukaan sprinklerit voivat olla normaali-, spray-, flat spray- tai sivusprinklereitä. Normaaლისprinkleri muodostaa pallomaisen, alaspäin ja sisäkattoon suuntautuvan vesisuihkun suojeltavalle alueelle siten, että 40 – 60 % kokonaisvesivirrasta suuntautuu alun perin alaspäin. Spray-sprinkleri on kehitysversio normaalista sprinkleristä muodostaen parabolisen, alaspäin suuntautuvan vesisuihkun suojeltavalle alueelle siten, että 80 – 100 % kokonaisvesivirrasta suuntautuu alun perin alaspäin. Flat spray-sprinkleri on normaalisprinklerin ja spray-sprinklerin välimuoto eli se muodostaa parabolisen, alaspäin suuntautuvan vesisuihkun suojeltavalle alueelle siten, että 60 – 80 % kokonaisvesivirrasta suuntautuu alun perin alaspäin. Sivusprinkleri muodostaa puoliparaboloidin muotoisen vesijakautuman suojattavan alueen yläpuolelle. Lauetessaan sivusprinkleri suihkuttaa vettä sivuille ja alas. Niitä käytetään arkkitehtonisesti herkissä paikoissa, missä koko katon alueella kulkevat sprinkleriputkitukset eivät ole suotavia. (ISO 6182-1 2004)

Asennon mukaan sprinklerit voidaan jaotella ylöspäin, alaspäin ja sivusuuntaan asennettaviin sprinklereihin. Ylöspäin asennettavassa sprinklerissä vesivirta ohjataan ylöspäin kohti hajotuslevyä, joka on taivutettu hieman sprinklerin runkoa kohti, jolloin osa vedestä suuntautuu ylös ja osa kimpoaa alaspäin hajotuslevyn kautta. Alaspäin asennettavassa sprinklerissä vesivirta ohjataan alaspäin kohti hajotuslevyä, joka on suunnattu hieman alaspäin, jolloin suurin osa vedestä suuntautuu alaspäin. Sivusuuntaan asennettavassa sprinklerissä vesivirta ohjataan vaakasuunnassa hajotuslevyä vastaan. (ISO 6182-1 2004) Alaspäin asennetuilla sprinklereillä on potentiaalia toimittaa vettä suuremmalla nopeudella ja tiheydellä välittömästi sprinklerin alapuolelle. Ylöspäin asennettavat sprinklerit ovat puolestaan vähemmän alttiita mekaanisille vaurioille. (SFS-EN 12845 + A2 2009)

Laukeamisherkkyyys kuvaa, kuinka nopeasti sprinklerin lämpöelementti toimii palon aikana. Laukeamisherkkyyttä kuvaa vasteaika RTI (*Response Time Index*). Vasteaika mitataan asettamalla huoneenlämmössä ollut sprinkleri lämpimään kaasuvirtaan. Tämän jälkeen mitataan sekunneissa, kauanko lämpöelementillä kestää saavuttaa lämpötila, joka on noin 63% lämmitetyn ilmavirran lämpötilasta. Näin saatu arvo on kerroin tau, jota kerrotaan ilmavirran nopeuden neliöjuurella, jolloin saadaan selville sprinklerin RTI (Kaava 1).

$$RTI = \tau * v^{\frac{1}{2}} \quad ((ms)^{\frac{1}{2}}) \quad (1)$$

$$RTI = \text{vasteaika } [(ms)^{\frac{1}{2}}]$$

$$\tau = \text{kerroin [s]}$$

$$v = \text{ilmavirran nopeus } [\frac{m}{s}]$$

Herkkyysluokat sprinklereille ovat nopean vasteajan sprinklerit ($RTI \leq 50 \text{ (ms)}^{1/2}$), erikoisvasteajan sprinklerit ($50 \text{ (ms)}^{1/2} \leq RTI \leq 80 \text{ (ms)}^{1/2}$) ja Standardi A –sprinklerit ($80 \text{ (ms)}^{1/2} \leq RTI \leq 200 \text{ (ms)}^{1/2}$). Telineistöissä ainoastaan nopean vasteajan sprinklerit ovat sallittuja. Kuiva-asennuksissa puolestaan sallitaan vain erikoisvasteajan ja Standardi A –sprinklerit. Muissa asennuksissa kaikki herkkyysluokat ovat soveltuvia. (CEA 4001:2007)

Spray-sprinkleri kehitettiin 1950-luvulla, kun tutkimuksissa oltiin havaittu kokonaan alaspäin suuntautuva vesijakautuma tehokkaammaksi. Spray- ja flat spray-sprinklerit ovatkin nykyään käytetympiä kuin normaalispinklerit. 1970-luvulla alettiin kehittää enemmän tiettyihin tiloihin erikoistuneita sprinklereitä. Vaativia varastopaloja varten kehitettiin muun muassa isopisarasprinklerit ja asuntopaloja varten asuntosprinklerit. Viime vuosikymmeninä tämä kehitys on jatkunut ja käyttökohteiden monipuolistuessa tarvitaan yhä laajempi kirjo erilaisia sprinklereitä. Esimerkiksi asunnoissa tarvitaan nopea vasteaika, jotta suhteellisen pienellä vesimäärällä pystytään kontrolloimaan asuntopalo ennen kuin palokuormat kasvavat liian suuriksi. (Maurice Jones Jr. 2008)

2.2.4 Venttiilit

Jokaisella sprinkleriasennuksella tulee olla numeroitu asennusventtiili (CEA 4001:2007). Asennusventtiili käsittää sulkuventtiilin, hälytysventtiilin sekä muut sprinkleriasennuksen hallintaan tarvittavat venttiilit ja laitteet. Asennusventtiili sijoitetaan sprinklerikeskukseen. Asennusventtiilin jälkeiseen sprinkleriputkistoon ei tulisi asentaa sulkuventtiilejä väärinkäytön estämisen vuoksi. Sulkuventtiili asennetaan vain asennusventtiilipakettiin. (RT 63-10990 2010)

Tyhjennysventtiili tulee asentaa välittömästi asennusventtiilin ja jokaisen jatkoventtiilin jälkeen sekä jokaiseen putkeen, joka ei tyhjene muun tyhjennysventtiilin kautta lukuun ottamatta laskuputkia yksittäisille sprinklereille märkäasennuksissa. Koeventtiilejä on asennettava siten, että hydrauliset hälytyslaitteet, sähköiset hälytyskytkimet sekä pumpun käynnistyslaitteet voidaan testata. Virtauksen kannalta kaukaisimpaan kohtaan jakojohdon päähän tulee asentaa koeventtiili tarvittavine putkistoineen ja suuttimineen. Paine mittarit tulee asentaa välittömästi ennen ja jälkeen asennusventtiiliä. (CEA 4001:2007)

2.2.5 Hälytyslaitteet ja hälytykset

Jokainen asennusventtiili on varustettava erillisellä vesimoottorilla toimivalla hälytyslaitteella tai sähköisellä painekeytkimellä, joka ilmaisee kyseisen asennusventtiilin laukeamisen. Hälytyslaitteet on sijoitettava niin lähelle hälytysventtiiliä kuin mahdollista. (CEA 4001:2007)

Sprinklerilaitteiston paloilmoitukset siirretään hätäkeskukseen, jolloin hätäkeskus hälyttää pelastuslaitoksen yksiköt kohteeseen. Hälytys saadaan myös paikallisesti. Paloilmoitus ja –hälytys saadaan myös silloin, kun sprinkleri tai putkisto rikkoutuu muun syyn takia. Sprinklerilaitteisto varustetaan myös valvontailmoituksilla. Valvontailmoituksilla varmistetaan, että sprinklerilaitteiston toimintaa vaarantavat tilanteet saadaan heti tietoon ja tarvittaviin toimenpiteisiin voidaan ryhtyä. Valvontailmoituksia ei siirretä hätäkeskukseen. (RT 63-10990 2010) Valvontailmoituksilla valvotaan esimerkiksi vesijohtoverkoston vedenpaineen alarajaa, auki pidettävien sulkuventtiilien aukioloa, vesisäiliön vesimäärän riittävyyttä sekä sprinkleripumpun käynnistysvalmiutta ja käyntiä (FK 2007).

2.2.6 Putkistot

Sprinklereillä suojattujen tilojen kattoon asennetaan putkisto, joka syöttää vettä sprinkleille. Putkisto lähtee asennusventtiililtä nousujohdolla, josta vesi siirtyy pääjakojohtoa pitkin suojattavaan tilaan. Pääjakojohto jakautuu alajakojohtoihin, jonka jälkeen voi mahdollisesti olla nousu- tai laskujohto putkiston saattamiseksi oikeaan korkeusasemaan suojattavaan kohteeseen nähden. Alajakojohdoilta vesi siirtyy haarajohtoihin, joihin sprinklerit liitetään joko suoraan tai sovituspukien kautta.

Putkien tulee olla terästä tai kuparia tai muuta materiaalia, joka täyttää järjestelmän käyttöpaikassa sovellettavat voimassaolevat vaatimukset. Yleisin käytetty putkimateriaali on sinkitty teräs, koska se on edullinen ja monipuolinen. Teräsputket, jotka eivät ole sinkittyjä tulee maalata ja kuiva- sekä ennakkolaukaisuasennuksissa tulee käyttää ensisijaisesti vain sinkittyjä putkia. (CEA 4001:2007) Nousu- ja pääjakojohdot ovat tyypillisesti kooltaan DN 100 – DN 150 teräsputkea ja muut putkiston osat ovat pääasiassa DN 25 – DN 80 teräsputkea (RT 63-10990 2010).

2.2.7 Laitteistojen ja komponenttien ylläpito

Sprinklerilaitteiston tarkoituksenmukainen toiminta edellyttää jatkuvaa toimintakunnossa olemista. Tulipalon sattuessa laitteiston tulee antaa automaattinen paloilmoitus sekä sammuttaa tai rajoittaa palo ja muina aikoina sen ei tule aiheuttaa virheellisiä hälytyksiä tai toimintoja. Laitteiston ylläpidolla huolehditaan sen toimintakyvystä koko käyttöiän ajan. Sprinklerilaitteiston ylläpitoon kuuluu sen toimintavalmiuden valvonta, laitteiston hoito ja huolto, laitteiston tehokkaan toiminnan varmistaminen tulipalossa sekä tehtyjen toimenpiteiden ja tapahtumien kirjaaminen (FK 2007). Laitteiston ylläpito tulee suorittaa kunnossapito-ohjelman mukaisesti.

Finanssialan Keskusliitto on julkaissut vuonna 2007 ohjeen ”Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laadintaohjeet” kunnossapito-ohjelman laatimista varten. Ohje on toteutettu vuonna 2007 julkaistun suunnittelu- ja asennusohjeen ”Sprinklerilaitteistot, Suunnittelu ja asentaminen, CEA 4001: 2007-06 (fi)” mukaisesti. (FK 2007)

Finanssialan Keskusliiton ohjeen mukaan sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelmassa tulee olla: (FK 2007)

- ylläpidossa tarvittavat kohde- ja yhteystiedot saatavilla ja ajan tasalla
- ohjeet tarvittavista toimenpiteistä sprinklerilaitteiston toimiessa, jotta laitteiston tehokkaasta toiminnasta voidaan varmistua ja laitteisto voidaan saattaa uudelleen toimintavalmiiksi viivytyksettä
- ohjeet tarvittavista toimenpiteistä toimintaa vaarantavien häiriöiden ja vikojen korjaamiseksi, jotta ne tehdään oikein ja viivytyksettä heti niiden ilmettyä
- ohjeet säännöllisestä hoidosta, joilla todetaan ja varmistetaan sprinklerilaitteiston toimintavalmius
- ohjeet säännöllisestä huollosta, joilla ylläpidetään sprinklerilaitteiston luotettavuus ja varmistetaan häiriötön toiminta
- kunnossapitopäiväkirja, jolla seurataan sprinklerilaitteiston toteutunutta ylläpitoa

Laitteiston ylläpitoon liittyvissä tiedoissa esitetään sprinklerilaitteiston tärkeimmät tekniset tiedot sekä vastuuhenkilöiden ja yhteistyötahojen tiedot. Nämä tiedot kerätään tietokorttiin, josta ne ovat helposti löydettävissä hoito- ja huoltotoimenpiteiden sekä määräraikaistarkastusten yhteydessä. Tietokortin laadinnan yhteydessä laitteistoon liittyvä dokumentaatio kerätään yhteen. Dokumentaatio on arkistoitava siten, että sen luotettavuus säilyy koko laitteiston käyttöajan ajan ja dokumentaatio on tarvittaessa helposti saatavilla. (FK 2007)

Kunnossapito-ohjelmassa annetaan pelastusviranomaisille ja laitteiston hoitajalle toimintaohjeet sprinklerilaitteiston toimiessa tarvittavia varmistustoimenpiteitä sekä tilanteen jälkeen toteutettavia toimenpiteitä varten. Ohjeet laaditaan sekä tulipalon että vikalaukeamisen edellyttämiä toimenpiteitä varten. Automaattinen sprinklerilaitteisto on jatkuvasti valmiustilassa, mutta laitteiston toimiessa tulee kuitenkin mahdollisimman aikaisin varmistaa, että laitteisto toimii tarkoituksenmukaisesti ja toimintaa häiritseviä tekijöitä ei ole. Sammutustehon kannalta on erittäin tärkeää, että sprinkleriasennus saa riittävällä paineella riittävän vesimäärän ilman keskeytyksiä. Laitteiston toimiessa tärkein tehtävä onkin varmistaa vesilähteen riittävä vedensyöttö sprinklerisuuttimille vaaditun toimintaajan. Kun palo on saatu sammutettua ja paloalueella on riittävästi miehistöä ja sammutuskalustoa ehkäisemässä uudelleen syttyminen, voidaan sprinklerilaitteiston toiminta keskeyttää ja aloittaa toimenpiteet, joilla laitteisto saatetaan uudelleen valmiustilaan. Vikalaukeamisen jälkeen pääsulkuventtiili tulee sulkea vasta, kun on varmasti todettu, ettei kyseessä ole tulipalon seurauksena tapahtunut laitteiston toimiminen. Sprinklereillä suojattu alue tulee tarkistaa ja varmistaa järjestelmän toimimisen syy. Pääsulkuventtiili voidaan sulkea heti, mikäli laitteiston toimiminen on aiheutunut selvästi muusta syystä, esimerkiksi suuttimen mekaanisesta rikkoutumisesta. (FK 2007)

Sprinklerilaitteistojen toimintavarmuutta vaarantavien tai laitteiston vikalaukeamiseen johtavien tilanteiden välttämiseksi laitteisto on varusteltu valvontailmoituksilla, jotka antavat tiedon muodostuvasta tai syntyneestä häiriö- tai vikatilanteesta. Valvontailmoitusjärjestelmän kautta ilmenevät häiriö- tai vikatilanteet on välittömästi selvitettävä ja vaadittavat toimenpiteet tilanteen saattamiseksi normaaliksi on aloitettava. Valvontailmoitus voi johtua myös valvontalaitteen viasta, mutta se on verrattain harvinaista, koska valvontalaite koestetaan ja huolletaan säännöllisesti. (FK 2007)

Sprinklerilaitteiston hoito- ja huolto-ohjelma sisältää ohjeet koestuksia sekä hoito- ja huoltotoimenpiteitä varten. Koestuksilla varmistetaan, että laitteiston toimintavalmius on kunnossa ja paloilmoitukset sekä valvontailmoitukset toimivat. Hoitotoimenpiteillä varmennetaan laitteiston toimintavalmius ja korkea luotettavuus koetus- ja hoitajaksojen välillä. Samalla arvioidaan myös laitteiston eri komponenttien huollon tarve. Huoltotoimenpiteillä varmistetaan sprinklerilaitteiston häiriötön toiminta koko käyttöajan ajan ja ylläpidetään korkea luotettavuus. Tärkeimmät koestukset ja hoitotoimenpiteet tehdään säännöllisesti enintään kuukauden välein. Huoltotoimenpiteitä tehdään, kun hoitotoimenpiteen yhteydessä on havaittu siihen tarve. Joidenkin komponenttien osalta huoltotoimenpiteitä tehdään myös säännöllisesti, jolloin huoltovälin pituus on tyypillisesti yksi vuosi. (FK 2007)

Koestuksissa pyritään luomaan sprinklerilaitteiston toiminnan kannalta todellista tulipaloa vastaava tilanne. Esimerkiksi sprinkleripumpun käynnistymisen koestuksessa pumpun painepuolen vedenpainetta lasketaan käynnistysrajalle kuvaten tilannetta sprinklerilaitteistossa sprinklerin lauettua. Koestuksessa seurataan pumpun käynnistymistä ja käynnä, automaattivalvonnan kytkeytymistä sekä valvontailmoitusten siirtymistä. Märkähälytysventtiilin paloilmoituksen koestuksessa puolestaan hälytysventtiilin yläpuolelta laskeaan vettä koehälytysventtiilin kautta, mikä kuvaa yhden sprinklerin laukeamisesta aiheutuvaa veden virtausta. Koestuksessa tarkkaillaan märkähälytysventtiilin laukeamista, vesimootorikäyttöisen hälytyskellon toimintaa, paloilmoituksen siirtymistä hätäkeskukseen ja mahdollisten sisäisten hälytysten ja ohjausten toimintaa. Valvontailmoitusten koestuksissa kokeellisen häiriö- tai vikatilanteen aiheuttamisen jälkeen varmistetaan valvontailmoituksen saaminen ja sen siirtyminen valvontailmoitusten vastaanottoa paikkoihin. (FK 2007)

Sprinklerilaitteiston hoitotoimenpiteitä ovat muun muassa sulkuventtiilien oikean asennon tarkistaminen, dieselmootorin öljyn ja jäähdytysveden määrien tarkistukset sekä märkähälytysventtiilin ylä- ja alapaineen luenta ja painelukemien vertaaminen edellisiin luenta-arvoihin. Hoitotoimenpiteisiin kuuluu myös sprinklerien ja putkiston pitkän ajan luotettavuustarkastus. Tarkastus tehdään märkäasennuksissa 25 vuoden välein ja kuiva-asennuksissa 15 vuoden välein. Tehdyt hoitotoimenpiteet tulee kirjata ylös esimerkiksi sitä varten laadittuun lomakkeeseen. Hoitotoimenpiteitä tehtäessä pyritään havaitsemaan

komponentin kulumisesta tai ikääntymisestä seuraava epäluotettavan toiminnan mahdollisuus niin aikaisin, että huollon tarve tunnistetaan, mutta toimenpide voidaan siirtää seuraavaan vuosittaiseen huoltoon. (FK 2007)

Laitteiston säännöllistä huoltoa vaativille osille ja toiminnoille on laadittava huolto-ohjeet laitteiston valmistajan ja toteuttajan ohjeiden mukaisesti, jotta sprinklerilaitteisto pysyy toimintakunnossa ja kohteen käyttötarkoitusta vastaavana koko sen käyttöiän ajan. Huolto-toimenpiteitä tehdään, jos koestuksen tai hoitotoimenpiteen yhteydessä havaitaan komponentin vikaantuneen, tai toimivan epäluotettavasti. Huolto tulee tehdä heti, mikäli vikaantuminen vaarantaa sprinklerilaitteiston luotettavuuden ja jos huoltoa ei voida tehdä esimerkiksi varaosan puuttumisen vuoksi, tulee sprinklerilaitteiston toimintavarmuus varmistaa muilla toimenpiteillä. Huolto-toimenpiteitä tehdään myös, mikäli koestusten ja hoitotoimenpiteiden välillä ilmenee vika tai häiriö. Tällöin vikaantunut komponentti on korjattava tai huollettava välittömästi. Yllättäen vikaantuva komponentti tulee ottaa jatkossa tarkemman tai useammin tapahtuvan hoitotoimenpiteen tai säännöllisen huollon piiriin. Erityistä luotettavuutta edellytettävälle sprinklerilaitteiston komponenteille toteutetaan huolto-ohjelman mukaiset toimenpiteet säännöllisesti, vaikka hoitotoimenpiteiden yhteydessä ei olisi todettu huollon tarvetta. Tällä pyritään välttämään yllättävät, hankalaan aikaan tapahtuvat laitteiston luotettavuuden vaarantavat vikaantumiset, joiden välittömän korjaaminen voi olla haastavaa. (FK 2007)

Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laadintaohjeiden liitteessä 3 on taulukoitu laitteiston eri komponentteja koskevia hoito- ja huoltotoimenpiteitä. Taulukoissa on myös annettu aikavälit, joiden kuluessa toimenpiteet tulisi tehdä. Aikavälit perustuvat sprinklerilaitteiston suunnittelu- ja asennusohjeisiin sekä laitteiston komponenteista saatuun käyttökokemukseen. (FK 2007) Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelmaa laadittaessa voidaan taulukoista poimia kyseisen laitteiston komponentteja koskevat hoito- ja huoltotoimenpiteet ja muodostaa niistä mielekkäässä järjestyksessä etenevä työsuoritus.

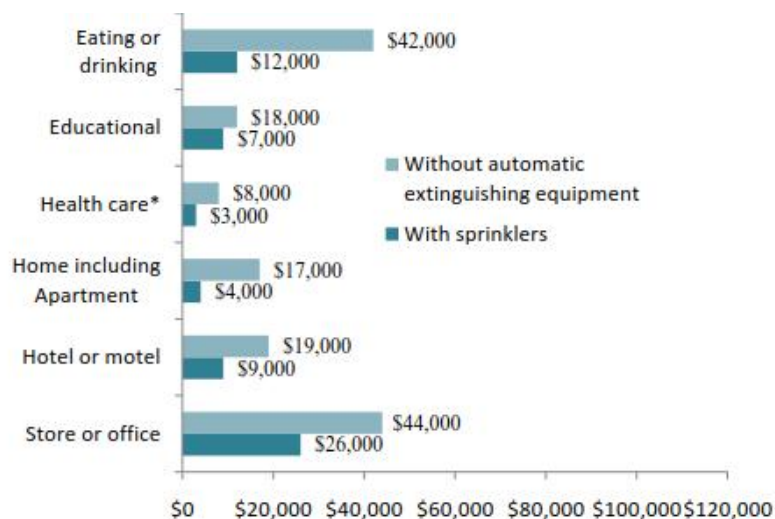
Laitteiston voi huoltaa Turvallisuus- ja kemikaaliviraston luettelossa mainittu sprinklerilaitteiston asennus- ja huoltotoimintaa harjoittava liike tai ammattitaitoinen ja sprinklerilaitteiston huoltoon perehtynyt laitteiston oma kunnossapitohenkilöstö. Myös laitevalmistajat voivat huoltaa edustamiaan laitteita. Uuden laitteiston asentamiseen rinnastettavia huoltotoimenpiteitä saavat tehdä vain Tukesin luetteloimat liikkeet. Huoltotyöt pyritään toteuttamaan siten, että irtikytettävä alue on mahdollisimman pieni. Mikäli sprinklerilaitteisto on irtikytettävä kokonaan, pyritään irtikytentäaika saamaan mahdollisimman lyhyeksi huoltotyön esivalmistuksilla. Pelastusviranomaisen kanssa sovitaan tarvittavista tilapäisistä suojaus- ja turvallisuustoimenpiteistä, joita voivat olla esimerkiksi kiinteistön vartioinnin järjestäminen, palovaaraa aiheuttavien tulitöiden kieltäminen ja sammutusvalmiuden tehostaminen pelastuslaitoksen sammutusyksiköllä. (FK 2007)

Laitteistolle tehdyistä toimenpiteistä pidetään kunnossapitopäiväkirjaa, jossa säilytetään täytetyt hoitolomakkeet hoito- ja huolto-ohjelman mukaisten toimenpiteiden toteutumisesta. Kunnossapitopäiväkirjaan kirjataan myös normaalikäytön tai hoito- ja huolto-ohjelman toimenpiteiden yhteydessä havaitut laitteiston toimintaa häiritsevät tai vaarantavat viat ja puutteet. Samanlaisina toistuvien vikojen tai puutteiden tullessa esille pyritään muuttamaan hoito- tai huolto-ohjelmaa siten, että vastaavat viat tai puutteet vältetään jatkossa. (FK 2007)

2.3 Sprinklauksen vaikutukset paloturvallisuuteen

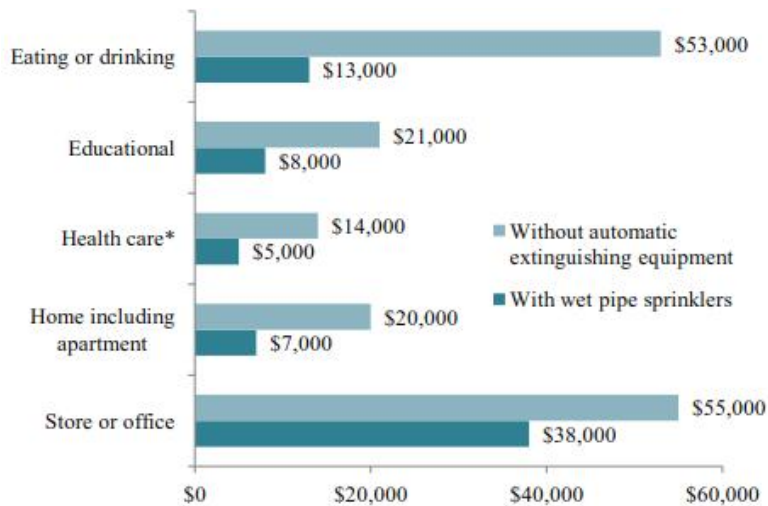
Sprinklereiden tehokkuus tulipalojen hallinnassa on näytetty toteen useissa tilastollisissa tutkimuksissa ja palotesteissä. Aiemmin sprinklereitä asennettiin rakennuksiin pitkälti omaisuuden suojelun takia paljolti vakuutusyhtiöiden vaikutuksesta, jotka tarjosivat merkittäviä vakuutuslennuksia erityisesti varastoihin ja teollisuusrakennuksiin, mikäli ne olivat suojattu sprinklereillä. Viime vuosikymmeninä sprinklereiden edut on huomattu myös tulipalon aikana rakennuksessa oleskelevien ihmisten suojelussa. Sprinklerit pystyvät pääsääntöisesti kontrolloimaan tulipalon ennen kuin se kehittyy täyden palon vaiheeseen. (Poon 2013) Tyypillisesti tehokkaasti toimiva sprinkleri onnistuu rajoittamaan palon alle 10 m²:n alalle ja pitämään lämpötilan alle 100 °C (Schultz 2005).

John R. Hall (2010, 2013) on tutkinut sprinklerilaitteistojen tehokkuutta ja toimintavarmuutta Yhdysvalloissa vuosina 2003-2007 ja 2007-2011. Näissä tutkimuksissa osoittautui, että kuolleisuus tulipaloon kohden on sprinklatuissa kodeissa 82-83 % pienempi verrattuna sprinklaamattomiin koteihin. Myös omaisuusvahingot pienenevät sprinklatuissa rakennuksissa kymmeniä prosentteja rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen.



*Health care refers to hospitals, nursing homes, clinics, doctor's offices, and mental retardation facilities.

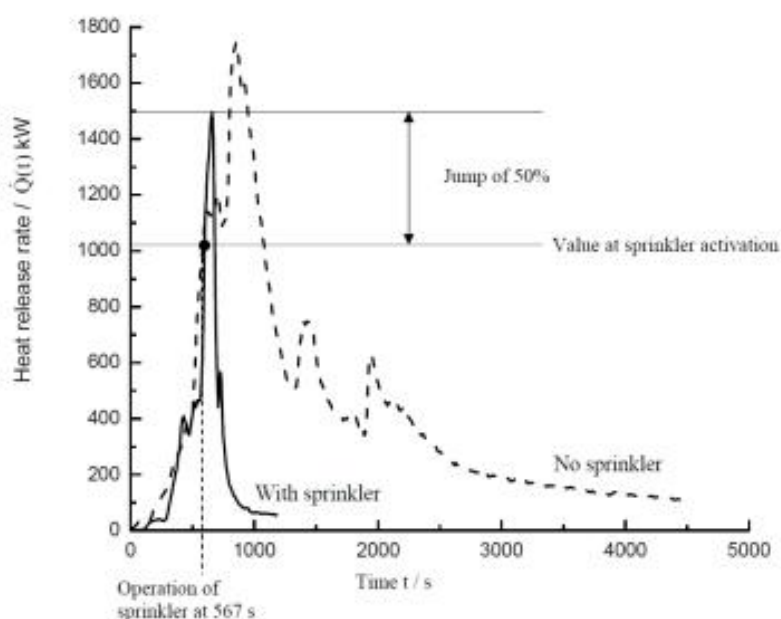
Kuva 7. Omaisuusvahingot tulipaloon kohden Yhdysvalloissa vuosina 2003-2007. (Hall 2010)



*Health care includes hospitals, nursing homes, clinics, and doctor's offices.

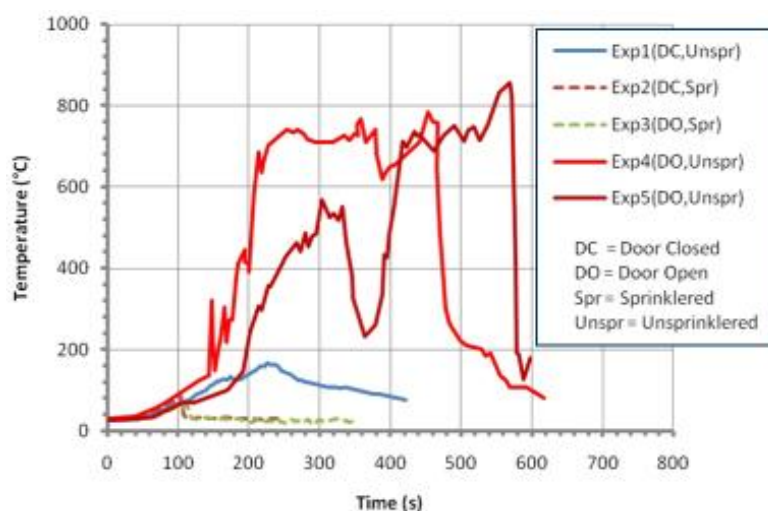
Kuva 8. Omaisuusvahingot tulipaloa kohden Yhdysvalloissa vuosina 2007-2011. (Hall 2013)

Sprinklereiden vaikutusta tulipalojen hallintaan on testattu täysimittaisissa palokokeissa, joissa on verrattu tulipalon kehittymistä sprinklatuissa ja sprinklaamattomissa huoneissa. Kiinalaisessa Harbinin yliopistossa tutkittiin vuonna 2004 toimiston lieskahdusta täysimittaisessa palokokeessa. Huone sisälsi pöydän, jonka päällä oli papereita ja kirjoja, tuolin, tietokoneen sekä kaapin. Ilman sprinklereitä lämmönluovutusnopeuden huippu oli 1,8 MW ja se saavutettiin 800 sekunnin kohdalla. Sprinklereillä suojatussa huoneessa sprinklerit aktivoituivat lämmönluovutusnopeuden ollessa 1,0 MW, mutta se nousi vielä arvoon 1,5 MW. Joka tapauksessa palon intensiteetti mitattuna vapautuneella energialla (käyrän alapuolinen pinta-ala) putosi merkittävästi, ollen vain 17 % sprinklaamattoman tapauksen intensiteetistä. (Chow 2005)



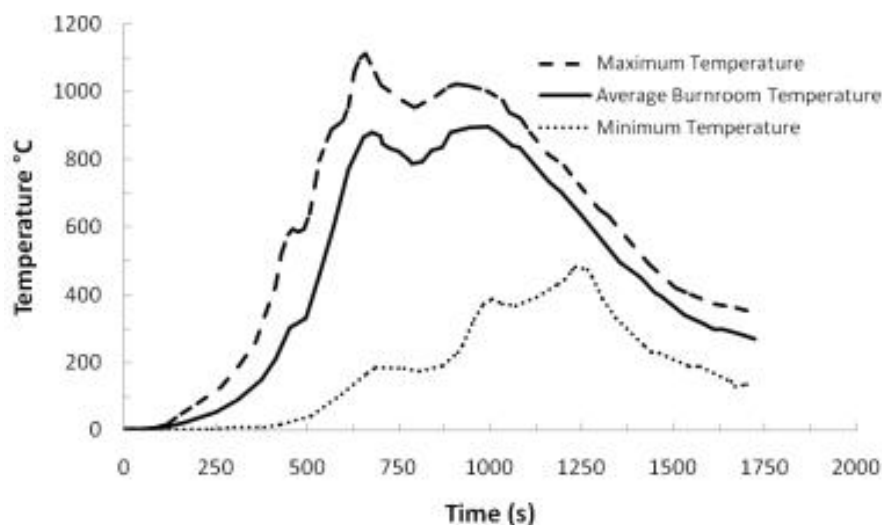
Kuva 9. Toimistopalotesti Harbinin yliopistossa. (Chow 2005)

Yhdysvaltalainen National Institute of Standards and Technology (NIST) on testannut sprinklereiden vaikutusta asuntolahuoneiden tulipaloihin. Kokeet suoritettiin sekä ovi auki että ovi kiinni. Sprinklerit aktivoituivat kahdessa minuutissa ja saivat palon hallintaan ennen lieskahdusta siten, että lämpötilat eivät ylittäneet 100 °C. Ilman sprinklereitä tulipalo kesti noin kymmenen minuuttia saavuttaen huippulämpötilan 800-850 °C. Oven ollessa kiinni lämpötila nousi vain 150 °C puutteellisen hapensaannin takia. (Madrzykowski & Walton 2010)

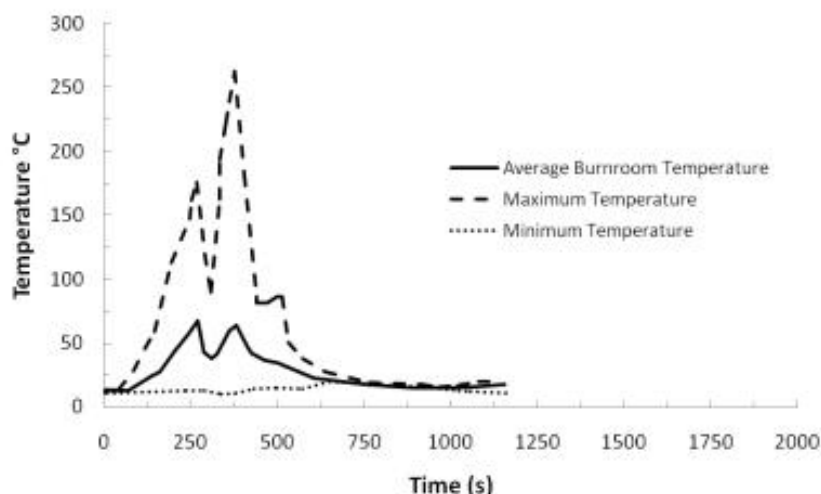


Kuva 10. Spinklattujen ja sprinklaamattomien asuntolapalojen lämpötilat 1,5 m korkeudella lattiasta. (Madrzykowski & Walton 2010)

Australialainen Fire Code Reform Centre (FCRC) testasi asuntopaloja täysimittaisella palokokeella. Huoneen ollessa spinklattu, lämpötilan maksimi nousi hetkellisesti 250 °C, huoneen keskilämpötilan pysyessä alle 100 °C. Sprinklaamattomassa tapauksessa lämpötila kohosi noin 1000 °C ja säilyi yli 500 °C noin 20 minuutin ajan. (Alam & Beever 1996)



Kuva 11. Sprinklaamattoman asuntopalon lämpötilat. (Alam & Beever 1996)



Kuva 12. Sprinklatun asuntopalon lämpötilat. (Alam & Beever 1996)

Näiden testien kohdalla täytyy kuitenkin muistaa, että ne ovat ennalta suunniteltuja ja mittaavat vain sprinklerien tehokkuutta silloin, kun ne ovat toiminnassa. Sprinklerien kokonaistoimintaa arvioidessa pitää huomioida myös sprinklerilaitteiston kyky ylipäättään toimia. Vaikka sprinklerilaitteistot ovatkin verrattain luotettavia, niin ne eivät tee passiivista palosuojausta tai muita sammutustoimenpiteitä täysin tarpeettomiksi. Rakennusten paloturvallisuus tulee aina suunnitella kokonaisuutena.

2.4 Sprinklauksen hyödyntäminen paloturvallisuussuunnittelussa

Rakennusten paloturvallisuuteen liittyvät määräykset on Suomessa annettu ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta (848/2017). Asetus tuli voimaan 1.1.2018 ja korvasi rakentamismääräyskokoelman osan E1. Maankäyttö- ja rakennuslain kohdassa 117 b § (21.12.2012/958) on annettu rakennusten paloturvallisuuden kannalta seuraavat olennaiset tekniset vaatimukset:

- palon syttymisen vaaraa on rajoitettava
- rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan ottaen huomioon rakennuksen sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen
- palon ja savun kehittymistä ja leviämistä rakennuksessa sekä palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa
- rakennuksen rakentamisessa on käytettävä paloturvallisuuden kannalta soveltuvia rakennustuotteita ja teknisiä laitteistoja
- rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin
- pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon

Paloturvallisuusvaatimuksen katsotaan täyttyvän noudattamalla ympäristöministeriön asetuksessa 848/2017 esitettyjä luokkia ja lukuarvoja tai suunnittelemalla ja rakentamalla rakennus perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet (848/2017). Seuraavaksi esitellään, miten sprinklaus voidaan huomioida paloturvallisuusvaatimuksen osoittamisessa näillä suunnittelutavoilla.

2.4.1 Taulukkomitoitus

Asetuksen 848/2017 mukaan, mikäli rakennukseen tai sen palo-osastoon asennetaan automaattinen sammutuslaitteisto, voidaan sallia lievennyksiä määräyksistä, jotka koskevat:

- rakennuksen kerrosalaa ja sen palo-osaston pinta-alaa
- rakennusten suurinta sallittua henkilömäärää tai paikkalukua
- kantavien ja jäykistävien rakenteiden luokkavaatimuksia
- osastoivien rakennusosien luokkavaatimuksia
- sisäpuolisten pintojen sekä ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusvälin ulkopinnan luokkavaatimuksia
- kulkureitin enimmäispituutta lähimpään uloskäytävään
- uloskäytävien vähimmäislukumäärää

Tarkoitukseen sopiva ja hätäkeskukseen kytketty automaattinen sammutuslaitteisto on pakollinen yli 56 metriä korkeissa P1-paloluokan rakennuksissa. P2-paloluokan rakennuksista automaattisella sammutuslaitteistolla on varustettava yli 2-kerroksiset asuin-, majoitus-, työpaikka-, kokoontumis- ja liikerakennukset sekä hoitolaitokset. Poikkeuksena enintään 4-kerroksinen asuinrakennus voidaan rakentaa ilman automaattista sammutuslaitteistoa, mikäli rakennuksen kaikki kerrokset kuuluvat asunnoittain samaan asuinhuoneistoon. P3-paloluokan rakennuksissa automaattinen sammutuslaitteisto ei ole pakollinen, mutta automaattisella sammutuslaitteistolla varustetuissa P3-luokan rakennuksissa kerrosalaa voidaan kasvattaa 1-kerroksisten rakennuksen osalta 2400 m²:stä 4800 m²:iin ja 2-kerroksisten rakennusten osalta 1600 m²:stä 2400 m²:iin. (848/2017)

1- ja 2-kerroksisten P2-paloluokan rakennusten suurinta sallittua henkilömäärää tai paikkalukua voidaan kasvattaa kaksinkertaiseksi, mikäli rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. P3-paloluokan osalta vastaava korotus voidaan tehdä 1-kerroksisiin rakennuksiin. Lisäksi P3-paloluokan 2-kerroksisissa asunnoissa suurinta sallittua henkilömäärää voidaan nostaa 150:stä 250:een.

Mikäli rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla, voidaan kantavien ja jäykistävien rakenteiden luokkavaatimuksia lieventää seuraavan taulukon mukaisesti (Taulukko 1). Taulukossa * tarkoittaa, että rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla ja A2, että kantavien rakenteiden on oltava vähintään A2-s1, d0-luokkaa.

Taulukko 1. Automaattisella sammutuslaitteistolla varustettuihin P1- ja P2 paloluokan rakennuksiin sallitut kantavien ja jäykistävien rakenteiden luokkavaatimusten lievennykset. (848/2017)

| Rakennus | Rakennuksen paloluokka ja palokuormaryhmät MJ/m ² | | | |
|---|--|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | P1 | | | P2 |
| | yli 1200 | 600 – 1200 | alle 600 | |
| 1-2-kerroksinen rakennus, yleensä | R120 (R60*) | R90 (R60*) | | |
| - hoitolaitokset, majoitustilat | R120, A2 (R60*, A2) | R90, A2 (R60*, A2) | | |
| - ylin kellarikerros | R120, A2 (R90*, A2) | R90, A2 (R60*, A2) | | |
| - yksikerroksinen tuotanto- ja varastorakennus | R60 (R30*) (R15*, A2) | R60 (R30*) (R15*, A2) | R60 (R30*) (R15*, A2) | R30 (R15*) (R15, A2) |
| Yli 2-kerroksinen, enintään 28 m korkea rakennus, yleensä | R180, A2 (R90*, A2) | R120, A2 (R60*, A2) | | |
| - ylin kellarikerros | R180, A2 (R90*, A2) | R120, A2 (R60*, A2) | | |
| - yli 2-kerroksinen asuinrakennus, jonka korkeus on enintään 14 m ja jonka kerrokset kuuluvat asunnoittain samaan huoneistoon | R45, A2 (R30*, A2) | R45, A2 (R30*, A2) | R45, A2 (R30*, A2) | R45 (R30*) |
| Yli 2-kerroksinen, yli 28 m mutta enintään 56 m korkea rakennus, yleensä | R240, A2 (R180*, A2) | R180, A2 (R120*, A2) | R120, A2 (R90*, A2) | |
| Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset | R240, A2 (R180*, A2) | R180, A2 (R120*, A2) | | R120, A2 (R90*, A2) |

Rakennusten palo-osastojen enimmäisalat määräytyvät rakennuksen käyttötarkoituksen ja paloluokan mukaan. Sallitut enimmäisalat on annettu asetuksen 848/2017 taulukossa 5. Useimmissa tapauksissa palo-osaston enimmäisalaa voidaan kasvattaa, mikäli rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Esimerkiksi paloluokissa P1 ja P2 1-kerroksisen kokoontumis- ja liiketilan palo-osaston enimmäisala on 2 400 m², mutta automaattisella sammutuslaitteistolla varustetussa P1-paloluokan rakennuksessa osastokokoa voidaan kasvattaa 24 000 m²:iin ja P2-paloluokan rakennuksessa 9 600 m²:iin. Tätä suuremmat palo-osastot vaativat oletettuun palonkehitykseen perustuvaa suunnittelua. (848/2017)

Automaattisella sammutuslaitteistolla varustetuissa rakennuksissa osastoivien rakennusosien luokkavaatimukseen sallitaan lievennyksiä P1-paloluokan yleisiin kerrososastointeihin ja kellarikerrosten osastointiin sekä kaikissa paloluokissa tuotanto- ja varastotilojen pinta-alaosastointiin. Sisäpuolisten pintojen osalta luokkavaatimuksia voidaan lieventää P2-paloluokan majoitustiloissa ja työpaikatiloissa sekä yli 300 m²:n palo-osastojen

osalta kaikkien paloluokkien kokoontumis- ja liiketiloissa. Ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusvälin ulkopinnan luokkavaatimuksiin sallitaan lievennyksiä P2-paloluokan hoitolaitoksissa. (848/2017)

Kulkureitin enimmäispituutta lähimpään uloskäytävään voidaan kasvattaa, mikäli poistumisalue on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Tämä lievennys ei kuitenkaan koske hoitolaitosten yöpymistiloja eikä poistumisalueita, joista on vain yksi uloskäytävä. Uloskäytävien vähimmäislukumäärään sallitaan lievennys siten, että ylimmän kerroksen lattian etäisyyden ollessa 24-52 metriä sitä palvelevan porrashuoneen sisäkäyntitasosta, riittää yksi uloskäytävä kahden sijaan. (848/2017)

Asetuksen 848/2017 mukaisessa taulukkomitoituksessa sprinklerilaitteiston luotettavuusprosenttia ei voida huomioida. Laitteistolle on kuitenkin asetettu vaatimus, että sen tulee olla käyttökohteessaan riittävän luotettava ja kyettävä sammuttamaan tulipalo alkuvaiheessaan tai pitämään palo hallinnassa, kunnes lopullinen sammutus saadaan suoritetuksi muilla menetelmillä. Vaatimuksen katsotaan täyttyvän, kun laitteisto toteutetaan: (848/2017 perustelumuistio)

- P2-paloluokan enintään 14 m korkeissa asuinrakennuksissa SFS 5980-standardin 2-luokan vaatimusten mukaan
- P2-paloluokan enintään 28 m korkeissa rakennuksissa SFS-EN 12845-standardin OH-luokan vaatimusten mukaan ja sammutuslaitteisto varustetaan vähintään varmennetulla yksinkertaisella vesilähteellä
- Rakennuksen henkilömääriä tai paikkalukuja 1-kerroksisessa rakennuksessa, osastokokoa 1-kerroksisissa majoitustiloissa ja hoitolaitoksissa, sisäpuolisia pintoja, ulkoseinän ja tuuletusraon ulkopintoja ja kulkureitin pituuksia koskevista säännöksistä SFS 5980-standardin vaatimusten mukaan (ottaen huomioon standardin soveltamisalan käyttötarkoitukset)
- Rakennuksen kerrosalaa, henkilömääriä 2-kerroksisissa rakennuksissa, kantavia rakenteita, osastokokoa (muissa kuin edellisessä kohdassa määritellyissä tapauksissa), osastoivia rakennusosia ja uloskäytävien lukumäärää koskevista säännöksistä SFS-EN 12845-standardin määrittelemän sprinkleriluokan ja vesilähddevaatimusten mukaan, kuitenkin vähintään varmennetun yksinkertaisen vesilähteen vaatimusten mukaan.

2.4.2 Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus

Oletettuun palonkehitykseen perustuvan mitoituksen hyväksymiskriteerinä on se, että rakennus tulee suunnitella ja rakentaa siten, että oletettu palonkehitys kattaa rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Vaatimuksen täyttyminen on todennettava tapauskohtaisesti ottaen huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö. Suunnittelussa on käytettävä menetelmiä, joiden kelpoisuus on osoitettu. Kantavien rakenteiden osalta raken-

nusta pidetään riittävän paloturvallisena, mikäli yli 2-kerroksinen tai henkilöturvallisuuden kannalta vaativa 2-kerroksinen rakennus ei yleensä sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana tai 1-2-kerroksinen rakennus ei sorru poistumisen turvaamiseen, pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana. (848/2017)

Rakennuksen turvallisuustasoa tarkastellaan todennäköisyyspohjaisella riskitarkastelulla ja verrataan tasoa yllä esitettyyn hyväksymiskriteeriin. Mitoituksen hyväksymisperusteena on nykyistä turvallisuustasoa vastaava vähimmäisvaatimus. Yleensä vertailukohdana on asetuksen 848/2017 3 §:n mukainen suunnitelma eli kyseisen asetuksen luokkiin ja lukuarvoihin perustuva ratkaisu. Tämä määrittää hyväksytyksi ratkaisuksi. Tällöin tulee osoittaa, että tarkasteltavan kohteen elinkaaren aikana toteutuvat henkilö- ja omaisuusvahingot ovat enintään yhtä suuret kuin asetuksen 848/2017 luokkien ja lukuarvojen mukaan suunnitellulla vastaavalla rakennuksella. Oletettuun palonkehitykseen perustuva mitoitus soveltuu erityisesti vaativien kohteiden ja monimutkaisten ja vaikeasti rajattavien ongelmien tarkasteluun. Tätä tapaa voidaan käyttää myös silloin, kun rakennukselle halutaan asetuksen 848/2017 turvallisuustasoa parempi paloturvallisuus. (RIL 221-2003) Luotettavalla sprinklerilaitteistolla on merkittävä vaikutus paloriskianalyysin tuloksiin pienentämällä hallitsemattomien palojen todennäköisyyttä.

Palotilanteen kehittymistä voidaan mallintaa tapahtumapuulla. Esimerkiksi tutkittaessa rakenteita uhkaavan palon toistuvuutta tapahtumapuuhun lisätään kaikki tapahtuman todennäköisyyteen vaikuttavat tekijät. Näitä tekijöitä voivat olla syttymistäajuus, alkusammutuksen onnistuminen, sprinklerin suunniteltu toiminta, rakenteiden kannalta kriittisen palokuorman ylittyminen ja palokunnan toiminta. Palokunnan toimintaa ei kuitenkaan tyypillisesti oteta mitoituksessa huomioon. Seuraavassa kuvassa (Kuva 13) on Paloteknisen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy:n laatima tyypillinen palotilanteen kehittymisen kaavio, joka on esitetty Finnish Wood Research Oy:n julkaisussa Puukerrostalon palosuunnitteluohje – Toiminnallinen suunnittelu.

p_{vert} = vertailuratkaisun rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyys

p_{alk} = todennäköisyys alkusammutuksen onnistumiselle

$p_{pk,cr}$ = todennäköisyys sille, että rakenteiden kannalta kriittinen palokuorma ei ylitä (palokuorman fraktiili)

Syttymistaajuustiheyden ja alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyyden arvoja esitellään muun muassa VTT:n ja Pelastusopiston yhteistyönä tekemässä julkaisussa ”Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot” (Tillander et al. 2009). Rakenteiden kannalta kriittisen palokuorman ylittymisen todennäköisyyttä voidaan arvioida palokuorman tiheyden jakaumien avulla. Kantavien rakenteiden kannalta kriittinen palokuorman tiheys määritetään siten, että palorasitus vastaa rakenteiden luokkavaatimuksen mukaisen ajan standardipaloa. Sen jälkeen palokuorman tiheyden jakaumasta nähdään, kuinka todennäköisesti kriittinen palokuorma ylittyy.

Vertailuratkaisun rakenteita uhkaavan palon toistumisaika saadaan kertomalla syttymien toistumisaika eli syttymistaajuuden käänteisluku ja rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyys. Vertailuratkaisun turvallisuustason voidaan katsoa olevan riittävä, koska se on asetuksen 848/2017 luokkien ja lukuarvojen mukainen.

$$t_{vert} = \frac{1}{f} * p_{vert} \quad (4)$$

t_{vert} = rakenteita uhkaavan palon toistumisaika vertailuratkaisussa

Tarkasteltavan kohteen turvallisuustason tulee siis olla vähintään yhtä hyvä kuin edellä esitetyn vertailuratkaisun turvallisuustaso. Jos syttymistaajuudet ovat molemmissa tapauksissa samat, voidaan suoraan vertailla rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyyksiä.

$$p_{uhk} \leq p_{vert} \quad (5)$$

p_{uhk} = tarkasteltavan kohteen rakenteita uhkaavaksi paloksi kehittyvän syttymän todennäköisyys

Tarkasteltavan kohteen rakenteita uhkaavan palon todennäköisyyteen vaikuttaa myös sprinklerilaitteiston luotettavuus. Sprinklerilaitteiston epäonnistuneen toiminnan todennäköisyydellä kerrotaan alkusammutuksen epäonnistumisen todennäköisyyden ja rakenteiden kannalta kriittisen palokuorman ylittymisen todennäköisyyden tulo.

$$p_{uhk} = (1 - p_{spr}) * (1 - p_{alk}) * (1 - p_{pk,cr}) \quad (6)$$

p_{spr} = todennäköisyys sprinklerilaitteiston onnistuneelle toiminnalle

Nyt voidaan määrittää tarkasteltavan kohteen hyväksytty todennäköisyys kriittisen palokuorman ylittymiselle.

$$p_{pk,cr} = 1 - \frac{p_{uhk}}{(1-p_{alk})*(1-p_{spr})} \quad (7)$$

Kun hyväksytty todennäköisyys kriittisen palokuorman ylittymiselle on tiedossa, voidaan palokuorman tiheyden jakaumasta määrittää kriittinen palokuorman tiheys ja sen perusteella määrittää kantavien rakenteiden paloluokkavaatimukset.

2.5 Sprinklerilaitteiston luotettavuuteen vaikuttavat tekijät

Sprinklerilaitteiston luotettavuuteen vaikuttavat useat eri tekijät. Yksi vaikuttava tekijä on sprinkleriasennuksen tyyppi. Märkäasennus on asennustyypeistä eniten käytetty ja se on toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisin. Tutkimuksissa se on osoittautunut myös toimintavarmuudeltaan luotettavimmaksi. Yhdysvaltalaisissa Hallin tutkimuksissa märkäasennukset toimivat tehokkaasti 89-92 % tapauksista ja kuiva-asennukset 76-79 % tapauksista. (Hall 2010, 2013)

Sprinklerilaitteiston ikä vaikuttaa myös luotettavuuteen. Varsinkin vanhoissa laitteistoissa saattaa esiintyä korroosiota ja muita toimintavarmuutta ja -tehokkuutta alentavia tekijöitä. Laitteiston ikä vaikuttaa myös siinä mielessä, että sprinkleriteknologia on kehittynyt vuosikymmenten kuluessa. Esimerkiksi 1950-luvulla kehitetyt Spray-sprinklerit osoittautuivat normaalisprinklereitä tehokkaammiksi ja myöhemmin on alettu kehittämään enemmän tietynlaisiin kohteisiin erikoistuneita sprinklereitä. Määräykset ja ohjeet koskien sprinklerilaitteistojen suunnittelua, asennusta ja ylläpitoa ovat parantuneet merkittävästi, joten nykyään asennettavien sprinklerilaitteistojen voidaan olettaa toimivan vähintään yhtä luotettavasti kuin vanhemmat laitteistot.

Edelliseen olennaisesti liittyy laitteiston testaus ja ylläpito. Sprinklerilaitteiston ylläpidolla varmistetaan sen luotettava toiminta koko käyttöiän ajan. Ylläpitoon kuuluu toimintavalmiuden valvonta, laitteiston hoito ja huolto, laitteiston tehokkaan toiminnan varmistaminen tulipalossa ja tehtyjen toimenpiteiden ja tapahtumien kirjaaminen. Ylläpito tulee toteuttaa kunnossapito-ohjelman mukaisesti. Suomessa Finanssialan Keskusliiton asettama työryhmä on tehnyt ohjeen (FK 2007) sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laatimiseksi.

Rakennuksen käyttötarkoitus voi vaikuttaa sprinklerilaitteiston luotettavuuteen. Esimerkiksi asuntokohteissa inhimillisen virheen mahdollisuus voi olla suurempi kuin teollisuuskohteissa. Toisaalta käyttötarkoitus vaikuttaa myös rakennuksessa todennäköisimmin tapahtuviin paloskenaarioihin, mikä pitää huomioida sprinklerilaitteistoa suunniteltaessa. Jos käyttötarkoitus muuttuu, pitää myös sprinklerilaitteiston soveltuvuus arvioida

uudelleen. Myös rakennuksen ja palo-osastojen koko ja muoto vaikuttavat sprinklerilaitteiston toimintaedellytyksiin. Rakennuksen muut järjestelmät kuten lämmitys ja ilmastointi saattavat nekin vaikuttaa sprinklerilaitteiston toimintaan. (Frank et al. 2013)

3. SPRINKLERILAITTEISTOJEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINNIN MENETELMÄT

Sprinklerilaitteistojen luotettavuuden arviointiin on yleisesti käytetty kahta erilaista lähestymistapaa: komponenttipohjaista ja systeemipohjaista lähestymistä. Komponenttipohjaisessa lähestymisessä laitteiston toimintavarmuusarvio rakennetaan yksittäisten komponenttien toimintavarmuuksien perusteella. Yksittäisten komponenttien toimintavarmuuksista muodostetaan koko laitteiston toimintavarmuusarvio yleensä vikapuiden avulla. Systeemipohjaisessa lähestymisessä tutkitaan sprinklerilaitteistojen toimivuutta aiemmissa palotapauksissa. Palotilastojen avulla arvioidaan suoraan koko sprinklerilaitteiston luotettavuus. (Frank et al. 2013)

3.1 Systeemipohjaiset tutkimukset

Suurin osa sprinklerilaitteistojen luotettavuuteen liittyvistä tutkimuksista ovat systeemipohjaisia. Näissä tutkimuksissa sprinklerilaitteiston luotettavuutta arvioidaan toteutuneiden tulipalojen pohjalta. Tällaisia tutkimuksia on tehty ainakin Yhdysvalloissa, Kanadassa, Australiassa, Uudessa-Seelannissa ja Isossa-Britanniassa (Juneja 2004; Frank & Spearpoint 2012; Marryatt 1988; Baldwin & North 1971; Linder 1993; Taylor 1990; Powers 1979; Miller 1974; US Department of Energy 2004; Hall 2006, 2007, 2010, 2013; Tryon & McKinnon 1969; Finucane & Pickney 1989; Richardson 1985; Kook 1990; Maybee 1988; NFPA 1970; Milne 1959; Kelly 2003; Smith 1983). Systeemipohjaisissa tutkimuksissa sprinklerilaitteiston onnistuneen toiminnan todennäköisyyttä arvioidaan yksinkertaisesti seuraavalla kaavalla:

$$P(\text{Onnistuminen}) = \frac{\text{Tapaukset, joissa laitteiston toiminta onnistui}}{\text{Kaikki tapaukset, joissa laitteiston olisi pitänyt toimia}} \quad (8)$$

Systeemipohjaisten tutkimusten luotettavuusarviot vaihtelevat todella merkittävästi. Tämän tutkimuksen yhteydessä löydettyissä tutkimuksissa luotettavuusarviot vaihtelivat välillä 70,1 % ja 99,5 %. Erot arvioissa johtuvat tutkimukseen käytettävästä aineistosta ja eroissa tulkinnassa, että mikä tulkitaan onnistuneeksi sammutukseksi ja millaiset palot otetaan tutkimukseen mukaan. Huonoin luotettavuus eli 70,1 % oli saatu Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa (Juneja 2004), jossa tutkittiin Ontarion osavaltiossa sattuneita tulipaloja vuosilta 1995-2002. Suurin osa epäonnistuneista sammutuksista olivat kuitenkin tapauksia, joissa tulipalo oli sprinklatun alueen ulkopuolella tai lämpötila ei noussut niin korkealle, että sprinklerien olisi pitänytään aktivoitua. Paras luotettavuus eli 99,5 % puolestaan oli saatu australialaisessa tutkimuksessa (Marryatt 1988), jossa tutkittiin Australian ja Uuden-Seelannin sprinklerilaitteistojen luotettavuutta vuosina 1886-1986. Tässä

tutkimuksessa mukana oli vain tapaukset, joissa sprinklerit aktivoituivat, lukuun ottamatta yhtä tapausta, jossa laitteisto oli täysin tuhoutunut räjähdysen johdosta (Frank et al. 2013).

Suurin eroavaisuus vertailtaessa eri systeemipohjaisia tutkimuksia tulee siinä, miten on käsitelty tulipalot, jotka eivät aktivoineet sprinklerilaitteistoa. Sprinklerilaitteisto voi olla aktivoitumatta seuraavista syistä:

- Tulipalosta vapautuva lämpö on riittämätön aktivoimaan sprinklerit
- Tulipalo on riittävän suuri aktivoimaan sprinklerit, mutta palo sattuu sprinklaamattomalla alueella
- Tulipalo on riittävän suuri ja alueella on sprinklereitä, mutta niiden aktivoituminen epäonnistuu

Kuten aiemmin todettiin, Juneja (2004) otti tutkimukseensa mukaan kaikki nämä tapaukset ja Marryatt (1988) puolestaan ei mitään. Tässä tutkimuksessa ei oteta mukaan tapauksia, joissa lämpö on riittämätön aktivoimaan sprinklerit tai palo sattuu sprinklatun alueen ulkopuolella, koska nämä tapaukset eivät ole kriittisiä sprinklerilaitteistolla suojattujen rakenteiden kannalta. Tällaiset tapaukset eivät myöskään kerro laitteiston luotettavuudesta, koska laitteistolla ei ole edes edellytyksiä toimia.

Keskeinen vaatimus onnistuneelle systeemipohjaiselle luotettavuusarviolle on käytettävän aineiston laatu. Tilastoihin tulisi olla raportoituna kaikki tulipalot, jotka sattuvat sprinklerilaitteistolla suojatulla alueella. Raporteissa tulisi täsmällisesti ilmoittaa ainakin automaattisen sammutuslaitteiston toiminnan onnistuminen sekä mahdollisen epäonnistumisen syy. Tutkimuksia vertailtaessa havaittiin, että monissa tapauksissa aineisto ei ollut riittävän täsmällistä. Esimerkiksi Ontarion (Juneja 2004) ja Uuden-Seelannin (Frank & Spearment 2012) palotilastoissa oli paljon raportoimattomia tai puutteellisesti raportoituja tapauksia, joissa laitteiston toimimattomuuden syytä ei voitu määrittää. Monien tutkimusten osalta aineistoa ei ollut esitelty, ja oikeastaan vain Hallin (2013 ja 2010) käyttämät Yhdysvaltain palotilastot (NFIRS) osoittautuivat riittävän täsmällisesti raportoiduiksi.

3.2 Komponenttipohjaiset tutkimukset

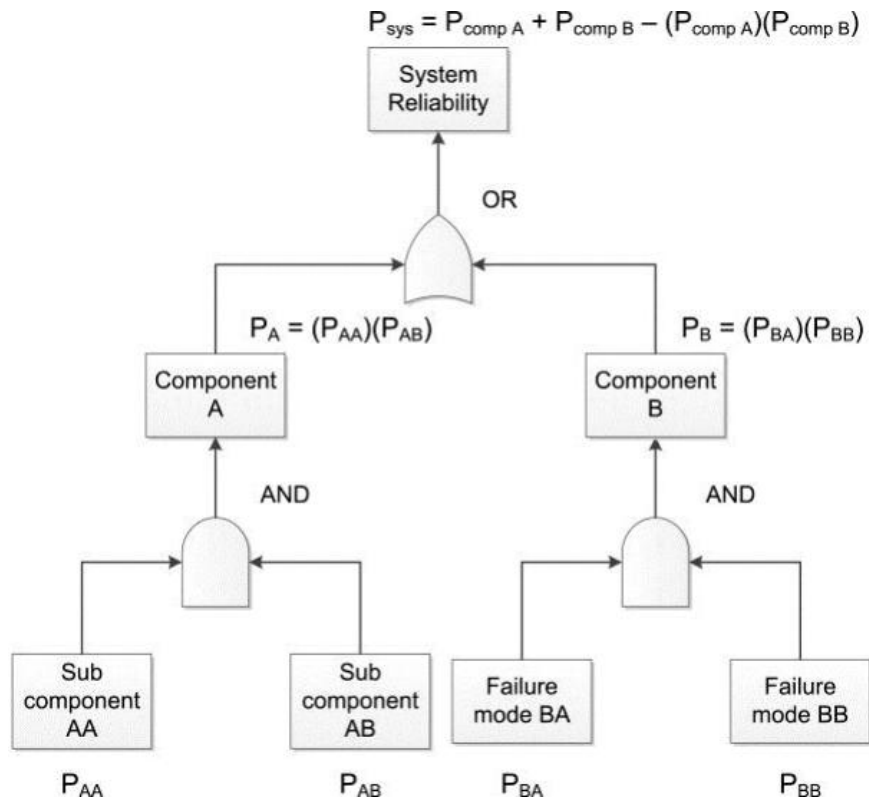
Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa sprinklerilaitteiston luotettavuusarvio tehdään tyypillisesti vikapuumallin avulla. Luotettavuusarvion muodostaminen koostuu seuraavista vaiheista: (Hauptmanns et al. 2008)

- vikapuun muodostaminen
- toimintavarmuuden määrittäminen yksittäisille komponenteille
- vikaantumistodennäköisyyden laskeminen vikapuumallilla
- tulosten tulkitseminen ja kehitysehdotusten tekeminen

3.2.1 Vikapuun muodostaminen

Vikapuumallia muodostettaessa ensimmäisenä määritetään ei-toivottu tapahtuma, jota tutkitaan. Sprinklerilaitteiston tapauksessa se on: ”Oletetun toiminnan epäonnistuminen tulipalon sattuessa”. Laitteiston kvalitatiiviset analyysit käyttäen ”entä-jos” lähestymistä sekä vika- ja vaikutusanalyysia tarjoavat valikoiman eri komponenteista tai tapahtumista kuten inhimillisestä virheestä aiheutuvia laitteiston osalaitteistojen vikaantumisia. Osalaitteiston vikaantuminen voi suoraan aiheuttaa ei-toivotun tapahtuman tai tehdä niin yhdistelmänä muiden osalaitteistojen tai komponenttien vikaantumisen kanssa. Yhdistelmiä kuvataan loogisilla JA (AND) sekä TAI (OR) porteilla. Porttityyppien valinnat ja vikapuun rakenne luonnollisesti heijastavat laitteiston reaktioita komponenttien vikaantumisiin. On syytä huomata, että monimutkaisetkin vuorovaikutukset laitteiston sisällä kuvataan käyttäen binaarilogiikkaa, joka huomioi ainoastaan komponentin toimimisen tai vikaantumisen. Mahdolliset välitilat määritellään konservatiivisesti vikaantumisiksi. (Hauptmanns et al. 2008)

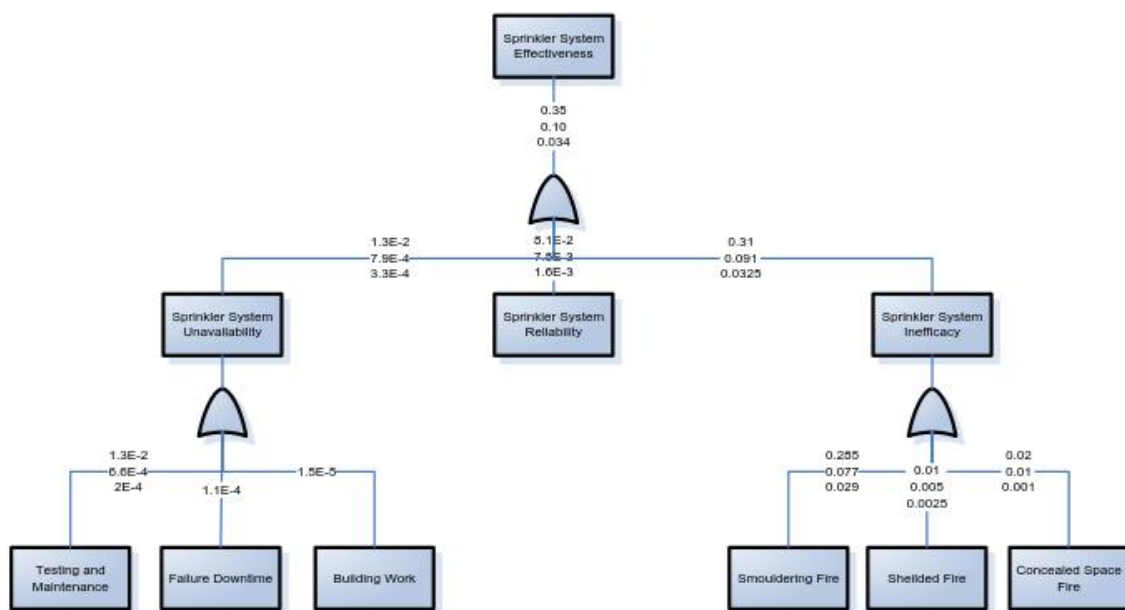
Vikapuu voidaan muodostaa myös siten, että tutkittavana tapahtumana on suoraan sprinklerilaitteiston toimintavarmuus. Tällöin vikapuun muodostetaan laitteiston komponenttien toimintavarmuuksista, jotka ovat siis vikaantumistodennäköisyyksien vastatapahtumia. Mikäli saatavilla on tietoa yksittäisten komponenttien eri vikaantumistavoista, myös niitä voidaan yhdistää vikapuussa (Frank et al. 2013). Seuraavassa kuvassa (Kuva 14) on yksinkertainen malli vikapuun periaatteesta:



Kuva 14. Yksinkertainen vikapuumalli. (Frank et al. 2013)

JA sekä TAI logiikoille esitetyt kaavat (Kuva 14) olettavat toimintavarmuustodennäköisyyksien olevan toisistaan riippumattomia. Tämä ei välttämättä aina ole realistinen oletus, mikäli vikaantumistavoissa on havaittavissa selviä syy-seuraussuhteita. (Frank et al. 2013) Tiettyyn sprinklerilaitteistoon sovellettava vikapuu riippuu aina kyseisen laitteiston komponenteista. Vikapuuhun sisällytettävät komponentit voivat olla esimerkiksi vesilähteitä, sprinklereitä, putkistoja ja venttiilejä.

Sprinklerilaitteiston kokonaisluotettavuutta määritettäessä tulee laitteiston toimintavarmuuden lisäksi huomioida myös laitteiston saatavilla oleminen ja toimintatehokkuus. Näille suureille muodostetaan omat vikapuut, jotka yhdistetään toimintavarmuuden vikapuun kanssa.



Kuva 15. Vikapuumalli sprinklerilaitteiston kokonaisluotettavuuden määrittämiseksi. (Marsh 2008)

3.2.2 Komponenttien toimintavarmuuksien määrittäminen

Yksittäisen komponentin toimintavarmuusarvio voidaan esittää joko vikaantumisen todennäköisyytenä tarvittaessa tai vikaantumistaajuutena. Sprinklerilaitteisto koostuu jatkuvasti käytössä olevista komponenteista sekä komponenteista, jotka ovat toiminnassa vain palo-olosuhteissa. Vaikka vikaantumistaajuus ei sovellukaan suoraan kaikkien sprinklerilaitteiston komponenttien toimintavarmuuden arvioimiseen, se on kuitenkin kiinnostava seuraavista syistä: (Marsh 2008)

- Osa komponenteista on jatkuvasti käytössä ja niille vikaantumistaajuus on suoraan hyödyllinen suure
- Vikaantumistaajuus antaa käsityksen järkevästä huoltovälistä, jota komponenteille tulisi noudattaa

- Tiedossa olevan kunnossapito-ohjelman ja huoltoon kuluvaan ajan avulla on mahdollista arvioida komponenttien saatavuutta
- Tiedossa olevan kunnossapito-ohjelman ja vikaantumistaajuuden avulla on mahdollista arvioida vikaantumisen todennäköisyys tarvittaessa

Komponentin vikaantumistaajuus λ [a^{-1} tai h^{-1}] voidaan laskea seuraavasti: (Moinuddin et al. 2008)

$$\lambda = \frac{\text{tutkittavan komponentin vikaantumisten määrä}}{\text{tutkittavan komponentin kappalemäärä} \times \text{tutkimusjakso}} \quad (9)$$

Rönty et al. (2005) tutkivat Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliiton keräämien tarkastusraporttien pohjalta sprinklerilaitteistojen vikaantumisia Suomessa vuosina 1985-1997. Tämän aineiston pohjalta arvioitiin laitteiston yksittäisten komponenttien vikaantumistaajuuksia (Kuva 16):

| Component | Failures | Exposure | Failure rate [1/a] | | |
|------------------------|----------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | min | point | max |
| Town main | 3 | 2137 | 2.6 E-4 | 1.0 E-3 | 2.5 E-3 |
| Storage tank | 0 | 353 | NA | NA | 6.5 E-3 |
| Pressure tank | 1 | 51 | 1.0 E-3 | 2.0 E-2 | 9.3 E-2 |
| Alarm valves | 10 | 8300 | 6.5 E-4 | 1.2 E-3 | 2.0 E-3 |
| Pipe array | 38 | 11 600 000 ^a | 2.4 E-6 ^b | 3.3 E-6 ^b | 4.3 E-6 ^b |
| Sprinkler heads | 577 | 3 490 000 | 1.5 E-4 | 1.7 E-4 | 1.8 E-4 |
| Diesel driven pump | 13 | 889 | 8.7 E-3 | 1.5 E-2 | 2.3 E-2 |
| Electr. driven pump | 5 | 809 | 2.5 E-3 | 6.2 E-3 | 1.3 E-3 |
| Sprinkler installation | 42 | 4013 | 8.0 E-3 | 1.1 E-2 | 1.4 E-2 |

^a Length years [am], ^b Unit [1/am].

Kuva 16. Sprinklerilaitteiston komponenttien vikaantumistaajuuksia perustuen suomalaisiin tilastoihin vuosilta 1985-1997. (Rönty et al. 2005)

Komponentin vikaantumisen todennäköisyys tarvittaessa P [-] voidaan arvioida vikaantumistaajuuden λ ja tarkastusvälin t [a tai h] avulla: (Moinuddin et al. 2008)

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Kaava olettaa vikaantumistaajuuden pysyvän vakiona ajan kuluessa ja aikajaksona tulee käyttää tarkastusväliä, jota sovelletaan juuri kyseisen laitteiston kyseiseen komponenttiin. (Frank et al. 2013)

Moinuddin et al. (2008) tutkivat 23 australialaisen korkean toimistorakennuksen sprinklerilaitteistojen luotettavuutta. Sprinklerilaitteistojen huolto- ja testausraporttien pohjalta määritettiin komponenttien vikaantumistaajuudet. Yllä esitetyn kaavan avulla arvioitiin

vikaantumistaajuuksien perusteella komponenttien vikaantumisen todennäköisyys tarvittaessa (Kuva 17):

| Component | Current study | | |
|---|-------------------------|-----------------------|----|
| | Mean value | 95% confidence | n |
| Alarm valve | 20.3×10^{-4} | 29.4×10^{-4} | 21 |
| Main stop valve | 2.33×10^{-3} | 3.19×10^{-3} | 20 |
| Zone isolation valve due to tenancy changes | 2.24×10^{-2} | 3.17×10^{-2} | 21 |
| Ordinary Stop valve | 0.67×10^{-3} | 0.96×10^{-3} | 22 |
| Non-return valve | 11.3×10^{-4} | 17.6×10^{-4} | 22 |
| Alarm gong | 2.56×10^{-2} | 4.78×10^{-2} | 21 |
| Sprinkler head | 782×10^{-4} | - | - |
| Town main | 1.87×10^{-4} | 3.72×10^{-4} | 22 |
| Gravity tank | 2.28×10^{-4} | 2.28×10^{-4} | 9 |
| Storage tank | 4.64×10^{-3} | 9.34×10^{-3} | 10 |
| Water supply line (per m) | 12.9×10^{-6} | 21.8×10^{-6} | 23 |
| Back-up batteries for the diesel pump | 268×10^{-4} | 492×10^{-4} | 22 |
| Back-up batteries/UPS for FIP panel | 9.99×10^{-3} | 18×10^{-3} | 21 |
| Mains power in building | 16.1×10^{-5} | 31.1×10^{-5} | 23 |
| Building power generator | 5.24×10^{-3} | 12.5×10^{-3} | 15 |
| Pressure switch | 78.2×10^{-4} | 117×10^{-4} | 23 |
| Diesel pump | 84.1×10^{-3} | 121×10^{-3} | 23 |
| Electric pump | 12.7×10^{-3} | 19×10^{-3} | 23 |
| Direct brigade alarm | 52.7×10^{-4} | 95.7×10^{-4} | 18 |
| Jacking pump | 9.85×10^{-3} | 15.5×10^{-3} | 12 |
| Back-up batteries for brigade alarm | 2.57×10^{-3} | 6.71×10^{-3} | 20 |
| Pressure reducing valve | 4.77×10^{-3} | 10.4×10^{-3} | 9 |
| FIP | 9.9×10^{-2} | 13.5×10^{-2} | 21 |
| Back-up batteries/UPS for FIP | 1.0×10^{-2} | 1.80×10^{-2} | 21 |
| Monitor alarm/sensor | 3.29×10^{-2} | 7.02×10^{-2} | 20 |
| Fail to observe monitor alarm activation | Could not be determined | | |
| Underground pipe from town mains to tank corroded | Could not be determined | | |

Kuva 17. Australialaisten korkeiden toimistorakennusten sprinklerilaitteistojen komponenttien vikaantumistodennäköisyydet tarvittaessa. (Moinuddin et al. 2008)

Vikaantumisen todennäköisyys tarvittaessa voidaan määrittää suoraan tarkkailemalla tai mittaamalla vikaantumiskäyttäytymistä joukossa palotilanteita. Osa aineistosta perustuu suoraan todellisen laitteiston toimintaan ja osa kokeellisiin tutkimuksiin. (Marsh 2008) Esimerkiksi öljy- ja kaasuteollisuudelle luotettavuusdataa tuottava OREDA (2002) on tutkinut joidenkin sprinklerilaitteiston komponenttien toimintavarmuutta todellisissa palotilanteissa. Vanhemmista tutkimuksista Watanabe (1979) ja Moelling et al. (1980) ovat ilmoittaneet vikaantumisen todennäköisyyksiä tarvittaessa, mutta näihin tutkimuksiin ei ollut pääsyä, joten tiedonkeruutavasta ei ole tietoa.

3.2.3 Vikapuumallit

Vikapuumallit vaihtelevat kohdekohtaisesti johtuen erilaisista sprinklerilaitteistoista ja periaatteista vikapuun muodostamisessa. Australialaisten korkeiden toimistorakennusten sprinklerilaitteistojen luotettavuuden tutkimuksessa (Moinuddin et al. 2008) vikapuu (Kuva 18) on muodostettu tarkastelemalla mihin asti vesi laitteistossa etenee. Vikapuun huipputapahtumana on se, että sprinkleri ei toimita vettä. Tämän alapuolella on sprinkleripään vikaantuminen tai se, että vettä ei ole sprinkleripään takana. Vikapuu jatkuu sprinklerille johtavan putken vikaantumisella tai sillä, että vettä ei tule kerrokseen, jossa palo tapahtuu. Vikapuuta jatketaan tällä periaatteella vesilähteisiin asti.

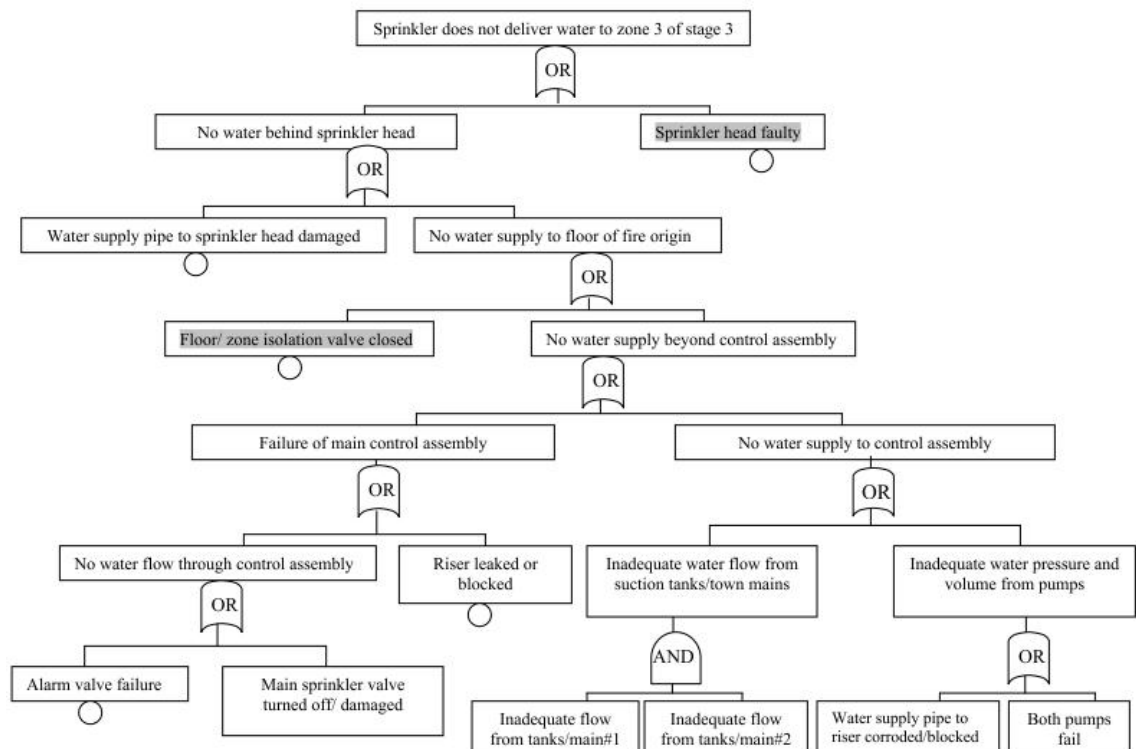
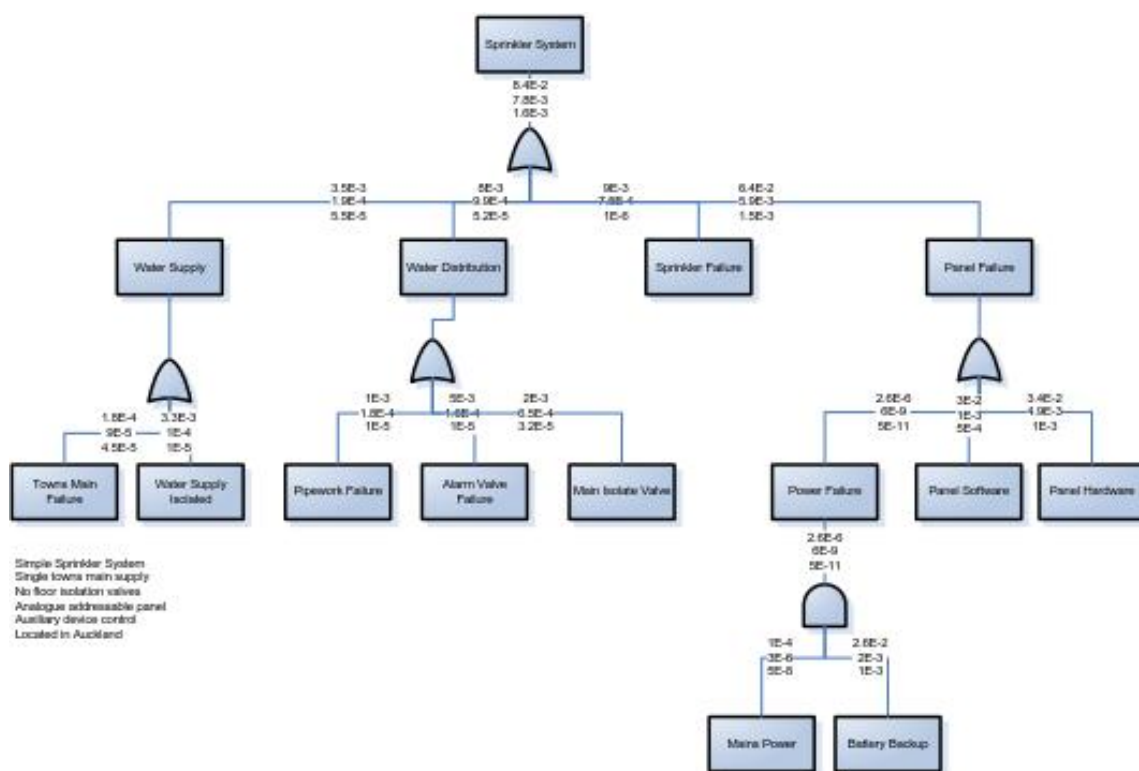


Fig. 4. Fault tree of a downfeed sprinkler system

Kuva 18. Vikapuumalli. (Moinuddin et al. 2008)

Monissa muissa vikapuissa huipputapahtuman alle asetetaan rinnakkain useampien komponenttien ja osalaitteistojen vikaantumisia. Jos vikapuu perustuu puhtaasti komponentteihin, niin tyypillisesti vierekkäin asetetaan vesilähteet, putkisto, sprinkleripäät ja venttiilit. Joissain malleissa kuitenkin esimerkiksi vedenjakeluun on yhdistetty sekä putkisto että venttiilit. Toisaalta esimerkiksi pumppuviat saattavat olla eritelty vesilähdevioista. Periaatteessa luotettavuusarvion lopputuloksen kannalta sillä ei ole merkitystä, miten komponentit ja osalaitteistot on vikapuuhun jäsennelty, mutta tutkimusten vertailua helpottaisi, mikäli käytössä olisi samat periaatteet.



Kuva 19. Vikapuumalli. (Marsh 2008)

Joissain tutkimuksissa (esimerkiksi Marsh 2008) on mukana myös hälytysjärjestelmän vikaantumiset (*Panel Failure*). Hälytysjärjestelmän vikaantumiset eivät kuitenkaan estä sprinklerilaitteiston vedenjakelua ja eivät siten ole rakenteiden kannalta kriittisiä. Osa vikaista keskittyy pelkästään laitteiston toimintavarmuuteen, mutta osa huomioi myös laitteiston saatavilla olon ja toimintatehokkuuden. Laitteiston toimintaan aiheutuu käyttökatoja testauksen, huollon sekä esimerkiksi rakennuksen remonttien takia. Mikäli käyttökatojen aikana rakennuksen paloturvallisuus on varmistettu muilla tavoin, voidaan sprinklerilaitteiston käyttökato kuitenkin jättää pois vikapuusta. Toimintatehokkuus voidaan huomioida siten, että lasketaan todennäköisyys, jolla vettä vapautuu riittävästi. Osa tulkitsee esimerkiksi kytevät palot siten, että laitteisto ei ole toiminut tehokkaasti, vaikka niissä ei laitteiston voi olettaakaan toimivan ja palot eivät ole rakenteiden

kannalta kriittisiä. Lopuksi saatavilla olo, toimintavarmuus ja toimintatehokkuus kootaan samaan vikapuuhun, jolloin tuloksena saadaan laitteiston luotettavuus.

3.3 Lähtötiedon ja tulosten oikeellisuus ja soveltuvuus

Sprinklerilaitteistot voivat vikaantua monista eri syistä, joten vikaantumisen todennäköisyyden arviointi on verrattain haastava tehtävä. Lisäksi kaikki vikaantumistyyppit ovat melko harvinaisia. Tämä johtaa käytettävissä olevan datan vähyteen arvioitaessa suoraan tietyn vikaantumistyyppin todennäköisyyttä. Monissa tutkimuksissa tutkimusten lähtötiedot on piilotettu toimintavarmuusarvion taakse eikä niihin ole pääsyä, jolloin on mahdotonta arvioida aineiston soveltuvuutta. (Sakenaite 2009)

Eri tutkimusten vertailu ja yhdistäminen on haastavaa, koska lähtöaineisto ja sen käsittely vaihtelee tutkimusten välillä paljon. Vikaantumissyitä jaotellaan eri tavoin eri maissa ja eri tutkijoiden kesken. Yhtenäinen terminologia ja vikaantumissyiden luokittelu helpottaisi tutkimusten vertailua. (Maksimovic 2011) Myös käytännöt tulipalojen raportoinnissa ja tilastoinnissa vaihtelevat maittäin paljon (Malm & Pettersson 2008). Kaikkia tapauksia ei välttämättä raportoida lainkaan ja osasta tapauksista ei pystytäkään määrittämään vikaantumissyitä. Myös kriteerit sammutuksen onnistumiselle vaihtelevat. Esimerkiksi Suomessa on käytössä kategoriat ”sammutti” ja ”rajoitti”, mutta myös kategoriassa ”sammutuslaitteisto ei toiminut” on paljon tapauksia, joissa palo ei päässyt leviämään ja sprinklerilaitteiston ei voinut edes olettaa toimivan. Jos palotilastoja ei analysoida tarkemmin, vaan oletetaan suoraan kaikki tapaukset epäonnistuneiksi, joissa laitteisto ei reagoi paloon, se voi johtaa verrattain alhaisiin luotettavuusarvioihin.

Yksi luotettavuusarvioita monimutkaistava tekijä on inhimilliset virheet vikaantumisyyssä (Maksimovic 2011). Osa tutkimuksista keskittyy vain sprinklerilaitteiston tekniseen toimintavarmuuteen, mutta monissa tilastollisissa tutkimuksissa (esimerkiksi Hall 2010, 2013) suurimmaksi syyksi laitteiston toimimattomuudelle on osoittautunut se, että laitteisto ei ole päällä. Toisaalta nykyään asennettavissa sprinklerilaitteistoissa tulee ilmoitus, mikäli laitteisto ei ole päällä. Muita inhimillisiä virheitä ovat suunnitteluvirheet ja asennusvirheet. Vikapuumallissa on vaikea arvioida inhimillisen virheen osuutta.

Tavallisesti sprinklerilaitteistot ovat käytössä useita vuosikymmeniä ja altistuvat vähitellen ikääntymiselle (Maksimovic 2011). Laitteistojen ikää ei kuitenkaan pääsääntöisesti ole huomioitu tutkimuksissa. Säännöllisillä tarkastuksilla ja huoltotoimenpiteillä on iso merkitys laitteiston toimintakyvyn säilyttämisessä. Iso osa tutkimuksista ja niihin käytetystä aineistosta on jo melko vanhoja. Esimerkiksi 1960- ja 1970-lukujen sprinklerilaitteistoja ei voida pitää täysin vertailukelpoisina nykYTEknologiaan perustuviin laitteistoihin verrattuna.

Systeemipohjaisten tutkimusten osalta voidaan kyseenalaistaa tilastoihin perustuvan aineiston soveltuvuus kohdekohtaisesti merkittävästi vaihtelevissa olosuhteissa. Voidaanko

esimerkiksi tietyn tyyppisistä rakennuksista kerättyä dataa soveltaa toisenlaisen käyttötarkoituksen rakennuksiin? Voidaanko tietyn valmistajan laitteistossa tapahtunutta vikaantumista pitää edustavana havaintona koko sprinklerilaitteistojen joukolle? Voidaanko eri tilastoista, maista, valmistajilta yms. tulevaa dataa yhdistää, jos vikaantumistodennäköisyydet eri lähteiden välillä vaihtelevat merkittävästi? (Sakenaite 2009)

4. SPRINKLERILAITTEISTOJEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Sprinklerilaitteistojen luotettavuutta arvioitiin tässä tutkimuksessa kahdella eri menetelmällä: systeemipohjaisesti pohjautuen PRONTO:n onnettomuustilastoihin sekä komponenttipohjaisesti vikapuumallin avulla. Lopuksi arvioitiin eri menetelmillä saatuja tuloksia.

4.1 Systeemipohjainen tutkimus

Systeemipohjaista luotettavuusanalyysyä varten tutkittiin Suomessa vuosina 1996 – 2016 sattuneita rakennuspaloja. Tutkimus tehtiin hyödyntäen pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO:a. PRONTO on pelastustoimen seuranta- ja kehittämistä sekä onnettomuuden selvittämistä varten kehitetty sisäasiainministeriön järjestelmä, johon on tilastoitu vuodesta 1996 lähtien kaikki pelastuslaitokselle ilmoitetut onnettomuudet (PRONTO 2017).

Vertailun vuoksi tutkittiin myös ulkomailla tehtyjä systeemipohjaisia tutkimuksia. Näiden tutkimusten osalta ei kuitenkaan ollut mahdollista päästä itse palotilastoihin, joten suoraa vertailua on vaikea tehdä. Yhdysvaltalaisen Hallin tekemissä tutkimuksissa (2010 ja 2013) oli kuitenkin eritelty syyt laitteiston toimimattomuudelle, joiden pohjalta katsottiin mihin luotettavuusarvio nousisi, jos osa toimimattomuuden syistä pystytään eliminomaan pois.

4.1.1 PRONTO-aineiston valintakriteerit

Monissa sprinklerilaitteiston luotettavuutta arvioivissa tutkimuksissa on mukana kaikki sprinklerilaitteistolla suojatuissa rakennuksissa sattuneet tulipalot riippumatta siitä, millainen palo on kyseessä. Tässä tutkimuksessa määritetään sprinklerilaitteistojen luotettavuutta ensisijaisesti kantavien rakenteiden tarkastelua varten. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tutkimukseen sisällytetään vain potentiaalisesti rakenteita uhkaavat tulipalot. Toiseksi tulipalon tulisi olla sellainen, että sprinklerilaitteiston voidaan olettaa reagoivan siihen, jotta laitteiston luotettavuuden arviointi on mielekästä. Tilastoissa esiintyy myös tapauksia, joissa sammutuslaitteisto on ollut manuaalinen ja nämä jätetään pois tutkimuksesta, koska tämä tutkimus keskittyy automaattisiin sammutuslaitteistoihin.

Usein tulipalo jää pieneksi, eikä lämpötila ehdi nousta riittävän korkealle sprinklerien reagoimiseksi ennen kuin tulipalo sammuu itsestään tai se sammutetaan joko alkusammutuksella tai pelastuslaitoksen toimesta. Tällaiset palot eivät uhkaa rakenteita eikä

sprinklerilaitteiston voida edes olettaa reagoivan niihin, joten ne rajataan pois tutkimuksesta. Samoin toimitaan niiden palojen osalta, jotka ovat sattuneet sprinklerilaitteistolla suojatun alueen ulkopuolella. Suojatun alueen ulkopuolella sprinklereiden vaikutusta ei ole huomioitu myöskään rakenteiden mitoituksessa, joten nämä tapaukset voidaan jättää huomioimatta.

Useissa tutkimuksissa suurin epäonnistuneeseen sammutukseen johtanut syy on se, että sprinklerilaitteisto on ollut pois päältä. Nämä tapaukset ovat hieman ongelmallisia, koska laitteistolla ei tietenkään ole edellytyksiä toimia, jos se ei ole päällä. Toisaalta rakenteita ei voi mitoitaa olettaen, että järjestelmä on aina päällä, jos niin ei todellisuudessa ole. Jos järjestelmä on pois päältä tietoisesti esimerkiksi remontin ajan, niin rakennuksen paloturvallisuus tulee varmistaa muilla keinoilla, esimerkiksi vartioinnilla (FK 2007). Epäonnistuneiksi tapauksiksi lasketaan siis vain tapaukset, joissa järjestelmä on pois päältä ilman syytä ja siihen ei ole varauduttu. Uusissa laitteistoissa tällaisetkin tapaukset pystytään sulkemaan suurelta osin pois, koska laitteisto antaa ilmoituksen, jos esimerkiksi sulkuventtiili on suljettuna.

Suunniteltaviin kohteisiin tulevat sprinklerilaitteistot ovat uusia ja nykyaikaiseen teknologiaan perustuvia, joten ei ole relevanttia arvioida niiden luotettavuutta eri aikakaudelta olevien tilastojen perusteella. PRONTO:a on ylläpidetty vuodesta 1996 lähtien ja sen jälkeen sattuneet tapaukset katsottiin vielä soveltuviksi tähän tutkimukseen, joten tutkimuksessa on mukana vuosina 1996-2016 sattuneet tapaukset. Myös uudemmissa tilastoissa on toki mukana tapauksia, joissa tulipalo on sattunut kymmeniä vuosia vanhalla sprinklerilaitteistolla suojatussa rakennuksessa. Näiden tapausten rajaaminen pois tilastoista on kuitenkin hankalaa ja toisaalta tutkimuksen kannalta relevanttia materiaalia on jo muutenkin hyvin rajallinen määrä saatavilla, joten aineistoa ei rajattu laitteiston iän perusteella.

4.1.2 PRONTO-aineistoon perustuva luotettavuusarvio

PRONTO:n onnettomuustilastoista poimittiin kaikki rakennuspalot, jotka olivat sattuneet automaattisella sammutuslaitteistolla suojatuissa rakennuksissa. Aineisto rajattiin kattamaan vain sprinklerilaitteistoilla yleissuojatut kohteet, joten kohdesuojatut tapaukset jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle. Myös tapaukset, joissa laitteistoa ei ollut määritelty yleissuojaavaksi tai kohdesuojaavaksi jätettiin pois, koska onnettomuusselosteiden perusteella ne vaikuttivat olevan pääasiassa kohdesuojaavia. Sammutusaineen osalta tutkittiin vain vettä sammutusaineenaan käyttävien laitteistojen luotettavuutta. Näillä hakuehdoilla löytyi yhteensä 2821 tapausta.

PRONTO:ssa automaattisen sammutuslaitteiston toiminnan onnistuminen on jaettu seuraaviin kategorioihin:

- Sammutti
- Rajoitti
- Toiminta tai vaikutus puutteellista
- Sammutuslaitteisto ei toiminut

Lähtökohtaisesti tapaukset, joissa sprinklerilaitteisto sammutti tai rajoitti palon, laskettiin onnistuneiksi. Vastaavasti tapaukset, joissa sprinklerilaitteiston toiminta tai vaikutus oli puutteellista tai sammutuslaitteisto ei toiminut, laskettiin epäonnistuneiksi. Kaikkien tapauksien onnettomuus- ja rakennusselosteet käytiin kuitenkin läpi ja sen perusteella arvioitiin lopullisesti, täyttikö tapaus onnistuneen sammutuksen kriteerin eli kykenikö sprinklerilaitteisto estämään palon leviämisen rakenteita uhkaavaksi. Samalla rajattiin tutkimuksesta ulos tapaukset, jotka eivät täyttäneet luvussa 4.1.1 tilastoille annettuja soveltuvuus-kriteerejä. Mikäli onnettomuus- ja rakennusselosteissa oli epäselvyyksiä sprinklerilaitteiston toiminnan osalta, kysyttiin lisätietoja rakennuksen käyttäjiltä.

348 tapauksessa oli merkitty sprinklerilaitteiston sammuttaneen palon ja 422 tapauksessa rajoittaneen palon. 13 tapauksessa sammutuslaitteisto oli kuitenkin onnettomuusselosteen perusteella manuaalinen ja kahdessa tapauksessa palo oli sammutettu alkusammutuksella, joten nämä tapaukset rajattiin aineistosta pois. Kaikki jäljelle jääneet 755 tapausta täyttivät onnistuneen sammutuksen kriteerin.

Epäonnistuneet tapaukset on jaoteltu PRONTO:ssa vielä toimimattomuuden tai puutteellisen toiminnan syyn mukaan. Puutteellisen toiminnan osalta syyt ovat: palo suojatun alueen ulkopuolella rakennuksessa, vesi (tai muu sammute) ei riittänyt, sammutuslaitteiston tyyppi sopimaton tähän paloon sekä toiminta tai vaikutus puutteellista muusta syystä. Toimimattomuuden syyt ovat: palo suojatun alueen ulkopuolella rakennuksessa, palo rakennuksen ulkopuolella, inhimillinen virhe (laitteistossa esim. venttiili virheellisesti kiinni), sammutuslaitteisto ei ehtinyt toimia ja sammutuslaitteisto ei toiminut muusta syystä.

70 tapauksessa sprinklerilaitteiston toiminta oli merkitty puutteelliseksi. Näistä 57 olivat kuitenkin sellaisia, jotka eivät täyttäneet aineiston soveltuvuus-kriteerejä, koska palo oli jäänyt pieneksi ja sammunut itsestään tai sammutettu alkusammutuksella ennen kuin lämpötila nousi riittävän korkealle sprinklerin aktivoimiseksi. Neljässä tapauksessa sprinklerilaitteisto selvästi toimi puutteellisesti. Kuudessa tapauksessa onnettomuusselosteen tai käyttäjältä saatujen lisätietojen perusteella sprinklerilaitteisto kuitenkin rajoitti paloa, joten ne laskettiin onnistuneiksi tapauksiksi. Loput kolme tapausta olivat sellaisia, joissa sprinklerilaitteiston toimintaa ei kuvattu millään tavalla eikä myöskään kohteiden käyttäjiltä saatu lisätietoja laitteiston toiminnasta. Nämä kolme tapausta laskettiin myös epäonnistuneiksi, koska niissä toiminta oli kuitenkin merkitty puutteelliseksi ja parempaa tietoa ei ollut saatavilla.

Kokonaan toimimattomiksi oli merkitty 1981 tapausta. Näistä valtaosa eli 1920 tapausta olivat sellaisia, joissa toimimattomuuden syynä oli se, että laitteisto ei ehtinyt toimia tai palo oli joko rakennuksen tai suojatun alueen ulkopuolella. Yksikään näistä tapauksista ei täyttänyt tutkimuksen soveltuvuuskriteerejä. Lopuissa 61 tapauksessa toimimattomuuden syynä oli inhimillinen virhe tai sammutuslaitteisto ei toiminut muista syistä. Näistä viidessä tapauksessa sprinklerilaitteisto ei selvästi toiminut ja kolmessa tapauksessa sprinklerilaitteiston toimintaa ei ollut kuvattu millään tavalla eikä lisätietoja saatu myöskään rakennusten käyttäjiltä, joten myös ne laskettiin epäonnistuneiksi tapauksiksi. Loput 53 tapausta eivät täyttäneet aineiston soveltuvuuskriteerejä ja rajattiin siten pois tutkimuksesta.

Kaikkiaan 2821 tapauksesta 761 tapauksessa sprinklerilaitteisto onnistui sammuttamaan tai rajoittamaan palon. Yhdeksässä tapauksessa laitteiston toiminta selvästi epäonnistui ja kuudessa tapauksessa toiminnan onnistumiseen ei saatu varmuutta. Yhteensä siis 15 tapauksessa toiminta arvioitiin epäonnistuneeksi ja peräti 2045 tapausta eivät täyttäneet tutkimuksen soveltuvuuskriteerejä. Näiden tapausten suurta osuutta selittää se, että mukana olivat kaikki palot, joista tuli ilmoitus pelastuslaitokselle. Suurin osa tapauksista oli hyvin pieniä paloja, joihin automaattinen paloilmoitin reagoi, mutta lämpötila ei noussut sprinklerin reagoimisen vaativalle tasolle. Sprinklerilaitteistojen luotettavuudeksi saatiin näillä tuloksilla 98,1 %. Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 2) on koottu tutkimuksen tuloksia.

Taulukko 2. PRONTO-aineistoon pohjautuvan tilastollisen tutkimuksen tuloksia.

| PRONTO-luokittelu | Laitteiston toiminta tapauksessa | | | |
|--|----------------------------------|-------------|-----------|----------------------------|
| | Onnistui | Epäonnistui | Ei tietoa | Tapaus ei täytä kriteerejä |
| Sammutti tai rajoitti | 755 | | | 15 |
| Toiminta puutteellista | 6 | 4 | 3 | 57 |
| Laitteisto ei toiminut | | | | |
| - Palo rakennuksen tai suojatun alueen ulkopuolella tai laitteisto ei ehtinyt toimia | | | | 1920 |
| - Inhimillinen virhe tai laitteisto ei toiminut muusta syystä | | 5 | 3 | 53 |
| Yhteensä | 761 | 9 | 6 | 2045 |
| Luotettavuusprosentti | 98,1 % | | | |

15 epäonnistuneiksi luokitelluista tapauksista kymmenen sattui teollisuusrakennuksissa. Näistä kahdessa tapauksessa sprinklerilaitteisto ei toiminut, koska putkisto oli jäässä. Eräässä tapauksessa laitteisto ei ollut päällä, koska sprinklerisuutin puuttui edellisen palon jäljiltä ja tehtaalla ei ollut yhtään suutinta varalla. Yhdessä tapauksessa sprinklerilaitteiston purkutyöt oli aloitettu maalaamon purkutöiden yhteydessä, joten suojaustaso oli vajaa. Yhdessä tapauksessa palo oli mahdollisesti katkaissut ohjauskaapelin ennen sprinklerin laukeamista ja lopuissa viidessä tapauksessa laitteiston toimintaa ei ollut kuvattu PRONTO:ssa eikä lisätietoja saatu myöskään rakennuksen käyttäjiltä.

Tapauksista kaksi sattui ravintoloissa ja niissä molemmissa epäonnistuneen sammutuksen syynä oli liian ja rasvan peitossa ollut sprinklerisuutin. Vanhainkodissa sattui yksi tapaus, jossa sammutuslaitteistolla ei ollut varavoimaa ja sähkönsyöttö sähköpääkeskuksesta katkesi palon kehittyessä sähköpääkeskuksessa. Pysäköintihallissa sattuneessa tapauksessa märkähälytysventtiili oli suljettuna, koska putkia kuivatettiin jäätymisen vuoksi. Yksi tapauksista sattui koulun kattilahuoneen hakevarastossa, mutta tästä tapauksesta ei ollut lisätietoja PRONTO:ssa eikä niitä saatu myöskään rakennuksen käyttäjiltä. Kuten mainittiin, niin osassa epäonnistuneiksi merkityissä tapauksissa ei ollut kuvattu sprinklerilaitteiston toimintaa mitenkään. Epäonnistuneissa tapauksissa on mukana myös selvästi kohdesuojaavia laitteistoja, mutta niitä ei rajattu pois, koska onnistuneidenkin tapausten joukossa saattaa olla kohdesuojaavia laitteistoja. Todellisuudessa siis yleissuojaavien sprinklerilaitteistojen luotettavuus on todennäköisesti tässä tutkimuksessa saatua arvoa parempi.

4.1.3 Hallin tutkimusten analyysi

Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus verrata PRONTO-tutkimuksen tuloksia luvussa 3.1 esiteltyihin aiemmin tehtyihin systeemipohjaisiin tutkimuksiin, mutta tutkimusten tutkimusaineistoja ei ollut saatavilla sillä tarkkuudella, että aineistojen valintakriteerit olisi voitu asettaa samoiksi ja tuloksia järkevästi vertailla. Yhdysvaltalaisissa Hallin (2010, 2013) tutkimuksissa vikaantumisten syyt oli kuitenkin esitelty riittävän täsmällisesti tarkempaa analyysia varten. Tähän työhön käytiin läpi vuonna 2013 julkaistu Yhdysvaltojen palotilastot vuosilta 2007-2011 kattava tutkimus sekä vuonna 2010 julkaistu tutkimus, jonka tutkimusjakso oli vuodet 2003-2007. Hallin tutkimuksissa oli jo alun perin jätetty aineistosta pois pienet palot ja suojaamattoman alueen ulkopuolella sattuneet palot. Tässä tutkimuksessa katsottiin, kuinka paljon laitteistojen luotettavuusarvio nousisi, jos pystyttäisiin osoittamaan, että tietyistä syistä johtuvat epäonnistumiset voidaan eliminoida pois.

Vuoden 2013 tutkimuksessa sprinklerit reagoivat 91 % tapauksissa ja reagoidessaan toimivat tehokkaasti 96 % tapauksissa. Kokonaisluotettavuus oli näin ollen 87 %. Seuraavaksi on eritelty syitä sille, miksi sprinklerit eivät reagoineet:

- Järjestelmä oli pois päältä 53 %
 - Rakennus tyhjiällä, remontti, rakennusvaiheessa, vuoto järjestelmässä, likaa vesilähteessä, vaurioitunut trukin törmäyksestä
- Vääränlainen järjestelmä 20 %
 - väärä toimija (vesi, kemiallinen, hiilidioksidi)
 - väärä tyyppi (kuiva/märkä)
 - väärä suunnittelu (esim. väärä luokka)
- Huollon puute 15 %
 - sprinklerit pölyn tai maalin peitossa
- Manuaalinen puuttuminen järjestelmään 9 %
- Vaurioitunut komponentti 2 %

Sprinklereiden reagoimattomuus johtui siis 53 % tapauksissa siitä, että järjestelmä oli pois päältä. Näissä tilanteissa rakennuksen paloturvallisuus tulisi kuitenkin varmistaa muilla keinoin, esimerkiksi vartioinnilla (FK 2007), jolloin laitteiston reagoimattomuus ei olisi vaaraksi rakenteille. Nykyään laitteisto antaa myös ilmoituksen, mikäli sulkuventtiili on jäänyt kiinni, joten tahattomatkin laitteiston sulkemiset pystytään eliminoimaan uusien laitteistojen osalta.

20 % tapauksissa reagoimattomuus johtui vääränlaisesta järjestelmästä. Nämä epäonnistumiset eivät kerro itse sprinklerilaitteiston toimimattomuudesta, vaan ne johtuvat väärin suunnitellusta laitteistosta. Nykyään kuitenkin on valittavissa laaja valikoima erilaisia sprinklerilaitteistoja eri käyttötarkoituksiin ja käyttötarkoituksen muuttuessa tulee myös sprinklerilaitteiston toiminta arvioida uudelleen, joten vääränlaisesta järjestelmästä johtuvat epäonnistumiset pystytään suurelta osin välttämään. Jos tapaukset, joissa järjestelmä ei ollut päällä tai kohteessa oli vääränlainen järjestelmä, jätetään pois aineistosta, nousee sprinklerilaitteistojen reagoimisen luotettavuus arvoon 97,4 %. Lisäksi noudattamalla laitteiston kunnossapito-ohjelmaa, pystyttäisiin varmasti vähentämään huollon puutteesta aiheutuneita epäonnistumisia.

Syyt sprinklereiden tehokkaan toiminnan epäonnistumiselle olivat:

- Vesi ei tavoittanut paloa 43 %
 - palo suojassa sprinklereiltä (väliaikainen katto, huonekalun alla, varaston alemmissa kerroksissa)
- Vettä ei vapautunut tarpeeksi 31 %
 - ongelma sprinklerijärjestelmässä tai virhe mitoituksessa
- Vääränlainen järjestelmä 12 %
- Manuaalinen puuttuminen järjestelmään 5 %
- Vaurioitunut komponentti 4 %
- Huollon puute 4 %

Tehokkaan toiminnan epäonnistumisista 43 % johtui siitä, että sprinklereiden vesi ei tavoittanut paloa. Vesi saattaa kuitenkin rajata paloa ja laitteiston lauettessa lähtee automaattinen palohälytys pelastuslaitokselle, joka todennäköisesti ehtii paikalle ennen palon

leviämistä. Suojassa olevat palot eivät yleensä uhkaa rakenteita, jos ne eivät pääse leviämään ja esimerkiksi varastoissa myös ne ovat ehkäistävissä telineisiin asennettavilla sprinklereillä, joten nämä tapaukset rajataan pois aineistosta. Tehokkaan toiminnan epäonnistumisissa oli vääränlaisesta järjestelmästä johtuvia virheitä 12 % ja ne jätetään pois samoin perustein kuin epäonnistuneiden reagoitien tapauksessa. Tällä aineistolla sprinklerilaitteistojen tehokkaan toiminnan luotettavuus nousisi arvoon 98,2 % ja kokonaisluotettavuus olisi 95,3 %. Myös tehokkaan toiminnan luotettavuutta voitaisiin nostaa noudattamalla tarkemmin laitteiston kunnossapito-ohjelmaa, jolloin huollon puutteesta johtuvat epäonnistumiset vähenisivät.

Vuoden 2010 tutkimuksessa laitteiston epäonnistuneen toiminnan syyt jakautuivat seuraavasti:

Syitä sprinklereiden epäonnistuneelle reagoinnille:

- Järjestelmä pois päältä 64%
 - rakennus tyhjillään, remontti, rakennusvaiheessa, vuoto järjestelmässä, likaa vesilähteessä, vaurioitunut trukin törmäyksestä
- Vääränlainen järjestelmä 5%
 - väärä toimija (vesi, kemiallinen, hiilidioksidi)
 - väärä tyyppi (kuiva/märkä)
 - väärä suunnittelu (esim. väärä luokka)
- Huollon puute 6%
 - sprinklerit pölyn tai maalin peitossa
- Manuaalinen puuttuminen järjestelmään 17%
- Vaurioitunut komponentti 7%

Syitä sprinklereiden tehokkaan toiminnan epäonnistumiselle:

- Vesi ei tavoittanut paloa 44%
 - palo suojassa sprinklereiltä (väliaikainen katto, huonekalun alla, varaston alemmissa kerroksissa)
- Vettä ei vapautunut tarpeeksi 30%
 - ongelma sprinklerijärjestelmässä tai virhe mitoituksessa
- Vääränlainen järjestelmä 5%
- Manuaalinen puuttuminen järjestelmään 7%
- Vaurioitunut komponentti 8%
- Huollon puute 7%

Jos vuoden 2010 tutkimuksen aineistoon tehdään vastaavat muutokset kuin vuoden 2013 tutkimukseen, nousisi sprinklerilaitteistojen onnistunut reagointi 93 %:sta 97,7 %:iin. Tehokkaan toiminnan onnistuminen nousisi 97 %:sta 98,5 %:iin ja kokonaisluotettavuus sitten 91 %:sta 96,3 %:iin.

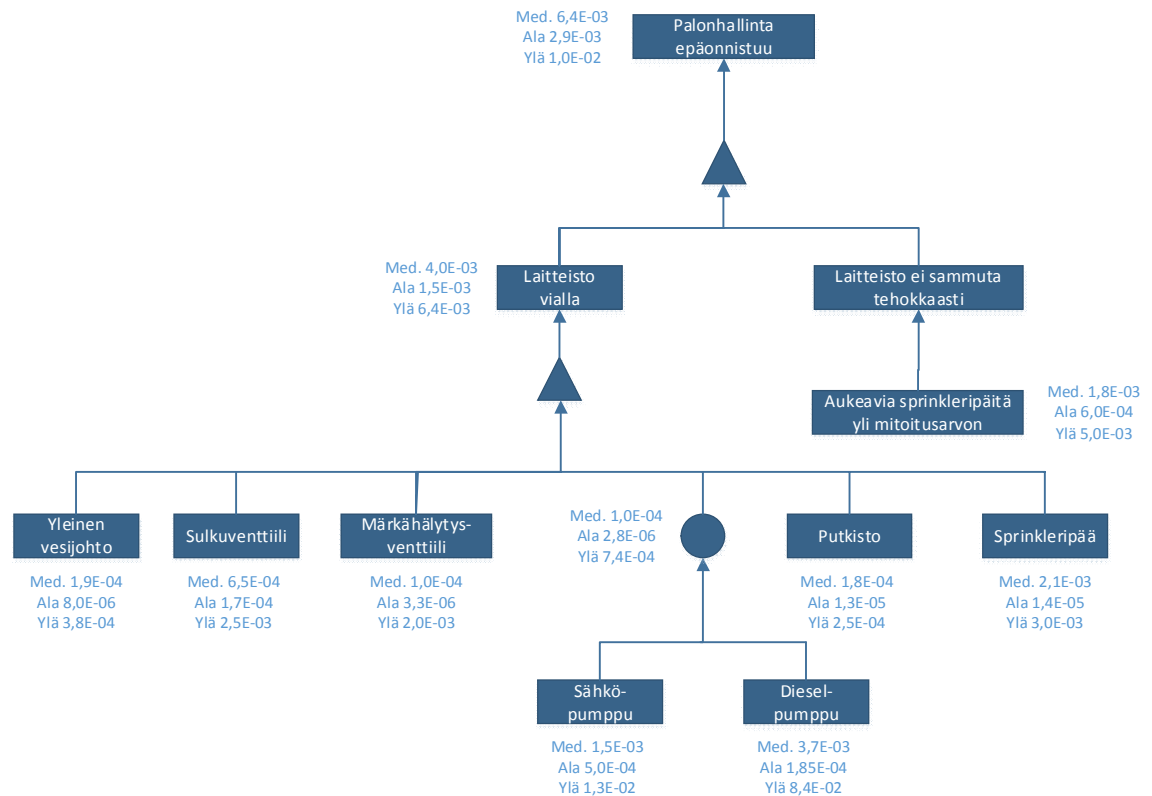
4.2 Komponenttipohjainen tutkimus

Komponenttipohjaista tutkimusta varten muodostettiin yksinkertainen vikapuun, joka koostuu tyypillisistä sprinklerilaitteiston komponenteista. Komponenttien vikaantumistodennäköisyydet kerättiin aiemmin tehdyistä tutkimuksista. Vikaantumistodennäköisyyksien arvoissa oli suuria vaihteluita eri lähteiden välillä, joten laskennassa hyödynnettiin Monte Carlo –simulointia.

4.2.1 Vikapuun valinta

Komponenttipohjaista tutkimusta varten tarvittavan vikapuumallin muodostaminen aloitettiin valitsemalla vikapuun huipputapahtumaksi palonhallinnan epäonnistuminen. Epäonnistunut palonhallinta voi johtua siitä, että laitteisto on vialla, laitteisto ei toimi tehokkaasti tai laitteisto ei ole käytettävissä. Käytettävissä olo jätettiin kuitenkin pois vikapuusta, koska laitteiston ollessa pois käytöstä tulee paloturvallisuus varmistaa muulla tavoin, esimerkiksi vartioinnilla (FK 2007). Tehokkaan toiminnan epäonnistuminen huomioitiin aukeavien sprinkleripäiden lukumäärän avulla. Jos aukeavia sprinkleripäitä on saatavilla olevaan vesimäärään nähden liikaa, niin yksittäisestä sprinkleristä tuleva vesimäärä ei välttämättä ole riittävä tehokkaan palonhallinnan varmistamiseksi.

Toimintavarmuuden osalta vikapuuhun valittiin tyypillinen tapaus, jossa on vesilähteenä yleinen vesijohto sekä rinnakkaisina pumppuina sähköpumppu ja dieselpumppu. Lisäksi vikapuuhun otettiin mukaan käytännössä aina sprinklerilaitteiston komponentteina olevat sulkuventtiili, märkähälytysventtiili, putkisto sekä sprinkleripää. Rinnakkaisten komponenttien osalta vikaantumiseen vaaditaan molempien komponenttien vikaantuminen. Alla olevassa kaaviossa (Kuva 20) tätä symboloi pallo. Muiden komponenttien osalta vikaantumiseen johtaa, jos yksikin komponenteista vikaantuu ja sitä kuvataan kolmiolla.



Kuva 20. Vikapuumalli.

4.2.2 Lähtöarvojen määrittäminen

Komponenttien vikaantumistodennäköisyydet määritettiin hyödyntämällä aiemmissä tutkimuksissa esitettyjä vikaantumisen todennäköisyyttä kuvaavia arvoja. Osassa lähteissä komponenttien vikaantumistodennäköisyydelle oli annettu alaraja-arvio, keskimääräinen arvio ja yläraja-arvio. Laskennan yksinkertaistamiseksi kaikista lähteistä otettiin tutkimukseen mukaan vain yksittäinen arvo, joten useamman arvon tapauksista valittiin keskimääräinen arvio. Osa arvoista oli annettu suoraan vikaantumisen todennäköisyytenä tarvittaessa ja osa vikaantumistaajuutena. Vikapuuhun tarvitaan vikaantumisen todennäköisyys tarvittaessa, joten vikaantumistaajuudet muutettiin vikaantumistodennäköisyyksiksi jo aiemmin kappaleessa 3.2.2 esitellyllä kaavalla (Kaava 10).

Tarkastusväli t määritettiin kullekin komponentille erikseen Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laadintaohjeessa annettujen ohjeistusten mukaan. Komponenteille annettu vikaantumistodennäköisyyksien arvot vaihtelivat todella paljon eri lähteiden välillä. Osasta tutkimuksista oli saatavilla vain tulokset eikä itse tutkimukseen ollut pääsyä, joten eri lähteissä annettujen lukuarvojen luotettavuutta oli vaikea arvioida. Komponenttien vikaantumistietoja oli saatavilla sen verran niukasti, että kaikki löydetty vikaantumistodennäköisyyksien arvot päätettiin ottaa mukaan tutkimukseen. Seuraavaksi käydään komponentteittain läpi vikaantumistodennäköisyyksiä ja vikaantumissyitä.

Yleisen vesijohdon osalta puutteellinen toiminta tai toimimattomuus voi johtua käyttökatkosta tai siitä, että vesijohto ei anna riittävää määrää vettä riittävällä paineella. Käyttökatkot johtuvat yleensä vesijohdon rikkoutumisesta tai vedenjakelussa sattuneen virheen korjaamisesta (Feeney 2001). Yleisen vesijohdon antama paine ja vesimäärä tarkistetaan säännöllisesti ja liian alhaisesta paineesta lähtee myös valvontailmoitus. Vikaantumistodennäköisyyksien laskemista varten yleisen vesijohdon tarkastusväliksi valittiin kolme kuukautta, koska vesijohdosta saatava vesimäärä tulee kokeilla kolmen kuukauden välein. (FK 2007) Vesijohdon paine luetaan ja paineen alarajan valvontailmoitus koetaan sen sijaan joka kuukausi. Yleisen vesijohdon kohdalla kannattaa huomioida kohteen sijainti luotettavuutta arvioitaessa, mikäli alueellisia luotettavuustietoja on saatavilla.

Taulukko 3. Yleisen vesijohdon vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 1,00E-03 | 2,50E-04 |
| Moinuddin et al. | | 1,87E-04 |
| Brammer | 3,20E-05 | 8,00E-06 |
| Feeney | 8,00E-05 | 2,00E-05 |
| Marsh | | 3,80E-04 |

Vesialtaan vikaantuminen on erittäin epätodennäköistä, mutta eri lähteissä on kuitenkin saatu vikaantumisen todennäköisyyksiä myös altaalle. Tarkastusväliksi valittiin yksi kuukausi, sillä altaassa olevan veden määrä ja laatu arvioidaan kuukausittain silmämääräisesti.

Taulukko 4. Vesialtaan vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 0 | 0 |
| Moinuddin et al. | | 2,28E-04 |
| Marsh | | 2,60E-06 |

Kaikkien normaalitilanteessa auki pidettävien sulkuventtiilien tulee olla lukittuja auki-asentoon hihnalla ja lukolla tai varustettuja sähköisellä aukiolon valvonnalla. Sulkuventtiilien tarkoituksenmukaiset toiminta-asennot tarkastetaan kuukausittain. Samalla tarkastetaan myös auki-asentoon lukittujen sulkuventtiilien hihnojen ja lukkojen kunto. Kolmen kuukauden välein sulkuventtiilit kokeillaan sulkemalla ja jälleen avaamalla. Sulkuventtiilien kunto tarkastetaan samalla silmämääräisesti. (FK 2007) Sammutuksen onnistumisen kannalta kriittinen sulkuventtiilin vikaantuminen voi siis sattua käytännössä vain, jos venttiili unohdetaan tarkastuksen tai huollon yhteydessä kiinni. Laskentaa varten tarkastusväliksi valittiin yksi kuukausi, koska tarkoituksenmukainen toiminta-asento riittää varmistamaan sammutusveden etenemisen laitteistossa.

Taulukko5. *Sulkuventtiilin vikaantumistodennäköisyydet.*

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|--------------------|--------------------------|--|
| Moinuddin et al. | | 2,30E-03 |
| Watanabe | | 2,47E-03 |
| Moelling et al. | | 1,90E-03 |
| Finucane & Pickney | 2,30E-03 | 1,92E-04 |
| Nash & Young | 2,00E-03 | 1,67E-04 |
| Marsh | | 6,50E-04 |

Märkähälytysventtiilien kunto tarkastetaan silmämääräisesti ja hälytysventtiilin yläpuolinen paine luetaan kuukausittain. Samalla koestetaan paloilmoitus tekemällä hälytyskoe avaamalla märkähälytysventtiilin hälytyskoeventtiili. (FK 2007) Tarkastusväliksi asetettiin siis yksi kuukausi. Märkähälytysventtiilin vikaantuminen voi johtua käytännössä ai-noastaan siitä, että hälytysventtiilin lautanen ei jostain syystä aukeaisi hälytysventtiilin yläpuolisen paineen laskettua.

Taulukko 6. Märkähälytysventtiilin vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|--------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 1,20E-03 | 1,00E-04 |
| Moinuddin et al. | | 2,00E-03 |
| Moelling et al. | | 1,00E-04 |
| Finucane & Pickney | 4,00E-04 | 3,33E-05 |
| Nash & Young | 4,00E-05 | 3,33E-06 |
| Marsh | | 1,60E-04 |

Sähkämöottorikäyttöisten pumppujen toimimattomuus voi johtua itse pumpun vikaantumisesta tai siitä, ettei palotilanteessa sähköverkosta saada virtaa. Useamman pumpun laitteistoissa vain yksi pumpuista voi olla sähkökäyttöinen, jotta paineenkorotus onnistuu myös sähkökatkon aikana. Sähkämöottorikäyttöiset pumput koestetaan kuukausittain (FK 2007). Pumppujen virtaama koestetaan kuitenkin kolmen kuukauden välein, joten laskentaan valittiin tarkastusväliksi kolme kuukautta.

Taulukko 7. Sähkämöottorikäyttöisten pumppujen vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 6,20E-03 | 1,55E-03 |
| Moinuddin et al. | | 1,27E-02 |
| Brammer | 2,00E-03 | 5,00E-04 |
| Feeney | 2,00E-03 | 5,00E-04 |
| Marsh | | 1,50E-03 |

Dieselmöottorikäyttöisten pumppujen vikaantuminen on keskimäärin yleisempää verrattuna sähkämöottorikäyttöisiin pumppuihin. Pumpuilla on sprinklerilaitteiston yksittäisistä komponenteista suurin vikaantumistodennäköisyys, mutta niiden merkitys koko laitteiston luotettavuuteen vaihtelee paljon riippuen laitteistosta. Jos laitteistolla on vain yksi

vesilähde ja sen painetta korotetaan vain yhdellä pumpulla, on koko laitteiston luotettavuus vahvasti riippuvainen pumpun luotettavuudesta (Feeney 2001). Kahden vesilähteen ja useamman pumpun laitteistoissa yksittäisen pumpun luotettavuuden merkitys on huomattavasti pienempi. Sähkämöottorikäyttöisten pumppujen tapaan myös dieselmöottorikäyttöiset pumput koestetaan kuukausittain ja virtaama kolmen kuukauden välein (FK 2007). Tarkastusväliksi laskentaan valittiin kolme kuukautta.

Taulukko 8. Dieselmöottorikäyttöisten pumppujen vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 1,5E-02 | 3,74E-03 |
| Moinuddin et al. | | 8,41E-02 |
| Watanabe | | 6,84E-03 |
| Moelling | | 1,4E-02 |
| Brammer | 1,6E-03 | 4,0E-04 |
| OREDA | 7,4E-04 | 1,85E-04 |
| Feeney | 1,5E-03 | 3,75E-04 |
| Marsh | | 3,7E-03 |

Sprinkleriputkiston vikaantumiset aiheutuvat pääasiassa korroosiosta. Korroosio voi aiheuttaa vuotoja tai pienentää putken sisähalkaisijaa ja siten hidastaa sammutusveden etenemistä. Korroosion lisäksi putkistoon voi kertyä myös kasaumia, jotka niin ikään saattavat hidastaa sammutusveden etenemistä. Sprinkleriputkistoista tarkastetaan kuukausittain, ettei putkistovuotoja esiinny. Lisäksi tarkastetaan putkiston kannatusten kunto, ja että putkiston kallistukset ovat säilyneet asennuksen mukaisina. Sprinkleriputkiston pitkän ajan luotettavuustarkastus tehdään 25 vuoden välein märkäasennuksissa ja 15 vuoden välein kuiva-asennuksissa. (FK 2007) Laskentaan valittiin tarkastusväliksi yksi kuukausi. Osassa lähteissä putkiston vikaantumistodennäköisyydet on annettu yhtä metriä kohden.

Taulukko 9. *Sprinkleriputkistojen vikaantumistodennäköisyydet.*

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 3,3E-06 (1/m) | 2,75E-07 (1/m) |
| Moinuddin et al. | | 1,29E-05 (1/m) |
| Marsh | | 1,8E-04 |

Sprinklerilaitteiston komponenteista sprinkleripäiden vikaantumista on tutkittu todennäköisesti eniten. Yleisin syy sprinkleripäiden toimimattomuudelle on se, että sprinkleriin on kertynyt kerrostuma siihen kuulumatonta materiaalia, joka toimii lämpöeristeenä ja siten heikentää sprinkleripään toimintaa. Kerrostuma voi olla maalia, likaa tai kovettunutta sakkaa. Metallista sulakelukkoa hyödyntävissä sprinkleripäissä myös korroosio voi olla ongelma. Lasikapselilla toimivissa suuttimissa puolestaan lasikapseli on voinut rikkoutua huomaamatta, jolloin neste on päässyt pois kapselista ja suutin ei palon sattuessa reagoi. (Zhuiykov & Dowling 2005) Sprinklerien puhtaus tulee tarkastaa kuukausittain, joten laskentaan valittiin tarkastusväliksi yksi kuukausi (FK 2007). Moinuddin et al. tutkimusta ei huomioitu laskennassa, koska sen antama vikaantumistodennäköisyys poikkesi merkittävästi muista lähteistä ja aineistona oli käytetty vain kahden rakennuksen sprinkleripäitä. (Moinuddin et al.)

Taulukko 10. *Sprinkleripäiden vikaantumistodennäköisyydet.*

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|--------------------|--------------------------|--|
| Rönty et al. | 1,7E-04 | 1,42E-05 |
| Watanabe | | 2,80E-03 |
| Moelling | | 2,97E-03 |
| Finucane & Pickney | 2,0E-02 | 1,67E-03 |
| Nash & Young | 3,1E-02 | 2,58E-03 |
| Marsh | | 7,5E-04 |

Yksisuuntaventtiilien toiminnan kannalta kriittistä on, että venttiili avautuu riittävästi virtauksen tapahtuessa myötäsuuntaan. Yksisuuntaventtiilien kunto tarkastetaan silmämääräisesti kolmen kuukauden välein, joten laskentaan tarkastusväliksi valittiin kolme kuukautta (FK 2007).

Taulukko 11. Yksisuuntaventtiilien vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|--------------------|--------------------------|--|
| Moinuddin et al. | | 1,13E-03 |
| Finucane & Pickney | 1,0E-02 | 2,5E-03 |
| Nash & Young | 1,0E-02 | 2,5E-03 |

Kaikkiin sprinkleripumppuyksiköihin on edellytetty kaksi sprinkleripumppukohtaista käynnistyspainekeytkintä 1.9.2002 jälkeen. Molemmat käynnistyspainekeytkimet koetaan erikseen kuukausittain sprinkleripumpun koestuksen yhteydessä. (FK 2007) Tarkastusväliksi laskentaan valittiin yksi kuukausi.

Taulukko 12. Käynnistyspainekeytkinten vikaantumistodennäköisyydet.

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Moinuddin et al. | | 7,82E-03 |
| Watanabe | | 8,99E-04 |

Normaalitilanteissa auki pidettävät sulkuventtiilit voidaan varustaa sähköisellä valvonnalla, joka antaa valvontailmoituksen, mikäli sulkuventtiiliä on vähänkin suljettu. Valvonta toteutetaan yleensä sulkuventtiiliin asennettavalla mikrokytkimellä ja ilmoitus johdetaan jatkuvasti miehitettyyn paikkaan. Valvontailmoituksia voidaan hyödyntää myös sprinklerilaitteiston muissa komponenteissa, esimerkiksi vesisäiliön veden määrän valvonnassa. Sulkuventtiilien valvontailmoituksen toiminta varmistetaan sulkuventtiilien koestuksen yhteydessä kolmen kuukauden välein. (FK 2007). Laskentaan tarkastusväliksi valittiin siis kolme kuukautta.

Taulukko 13. *Valvontailmoitusten vikaantumistodennäköisyydet.*

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|------------------|--------------------------|--|
| Moinuddin et al. | | 3,29E-02 |

Kuivahälytysventtiili koelaukaistaan vähintään kerran vuodessa. Koelaukaisussa avataan kuiva-asennuksen virtauksen kannalta verkoston kaukaisimpaan kohtaan asennettu koeventtiili ja mitataan aika, joka kuluu sen avaamisesta jatkuvan vesisuihkun purkautumiseen. Koelaukaisu voidaan korvata puolivuositain tapahtuvalla kuivahälytysventtiilin sisäisellä tarkastuksella. (FK 2007) Laskentaan tarkastusväliksi valittiin yksi vuosi.

Taulukko 14. *Kuivahälytysventtiilin vikaantumistodennäköisyydet.*

| Lähde | Vikaantumistaajuus [1/a] | Vikaantumistodennäköisyys tarvittaessa |
|--------------------|--------------------------|--|
| Finucane & Pickney | 8,0E-04 | 8,0E-04 |
| Nash & Young | 8,0E-05 | 8,0E-05 |

Sprinklerilaitteiston tehokkaan toiminnan arvioimiseen hyödynnettiin suoraan Jukka Hietaniemen kokoamaa tietoa liittyen aukeavien sprinklerien lukumäärään. Lähteenä on käytetty useita kansainvälisiä tutkimuksia (Marryatt 1988; APSAD 1997; Kirchner 1996; Kokkala 1997; Rönty et al. 2004; Linder 1993; Automatic Sprinkler Performance Tables 1970, Lessons of a high-rise fire 1976; Solomon 1997)

Taulukko 15. *Todennäköisyys sille, että avautuneita sprinklereitä on yli mitoitusarvon.*

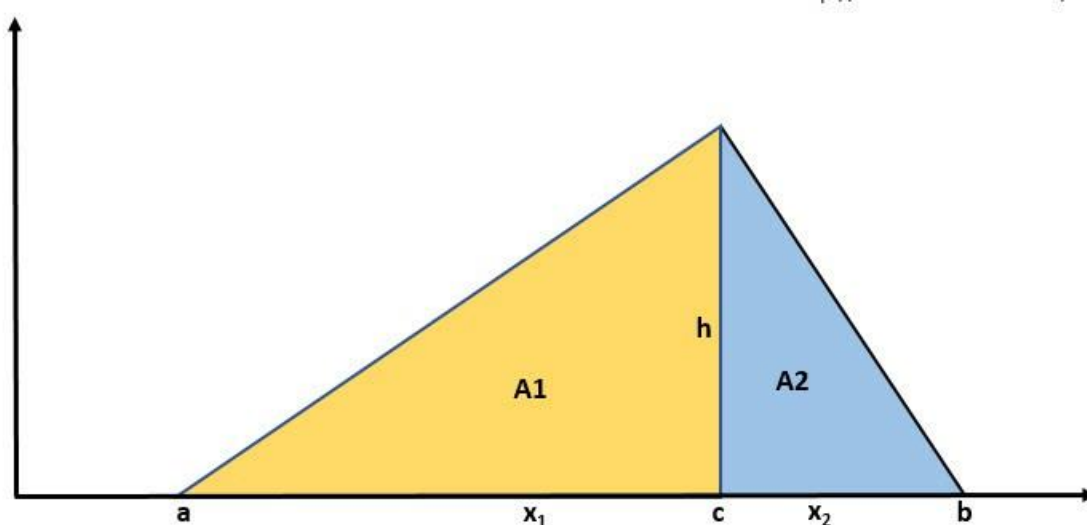
| Sprinkleriluokka | Avautuneita sprinklereitä yli mitoitusarvon |
|------------------|---|
| OH1 | 2,4E-02 |
| OH3 | 1,8E-03 |
| OH4 | 8,0E-04 |
| HHS | 4,9E-04 |

Vaikka sprinklereitä avautuisi yli mitoitusarvon, sprinklerilaitteisto kuitenkin usein pysyy rajaamaan paloa, eikä palonhallinta epäonnistu. Nämä arvot ovat siis konservatiivisia eikä niiden käyttäminen kevyemmissä sprinkleriluokissa ole välttämättä mielekäästä, koska se laskee laitteiston kokonaisluotettavuuden arvoa kohtuuttoman paljon. Raskaammissa luokissa todennäköisyys mitoitusarvon ylittävälle aukeavien sprinklerien määrälle on niin pieni, että yksinkertaisuuden vuoksi tätä arvoa voidaan käyttää suoraan sprinklerilaitteiston tehokkaan toiminnan epäonnistumisen todennäköisyytenä. Laskennassa käytettiin OH3-luokan todennäköisyyksiä.

4.2.3 Laskenta

Vikapuulaskennan lähtöarvoissa eli komponenttien vikaantumistodennäköisyyksien arvoissa oli valtavia vaihteluja eri lähteiden välillä. Tästä syystä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään Monte Carlo –simulointia. Monte Carlo –simulointi sopii juuri erityisen hyvin ongelmille, joissa lähtöarvojen tiedetään olevan epätarkkoja. Siinä lähtöarvoista muodostetaan jakauma, josta poimitaan lukuarvoja satunnaisesti ja suoritetaan niille tarvittavat laskelmat. Simulaatio suoritetaan useita kertoja, minkä jälkeen voidaan tehdä päätelmiä suoritettujen laskelmien tuloksista.

Tässä tutkimuksessa jokaisen komponentin vikaantumistodennäköisyyksistä muodostettiin erillinen kolmiojakauma. Kolmiojakauma muodostettiin siten, että a on komponentin vikaantumistodennäköisyyden minimiarvo, b on maksimiarvo ja c on mediaani. Kolmio kuvaa todennäköisyysjakaumaa ja sen kokonaispinta-ala on siis 1. Jokaisen komponentin kolmiojakaumasta poimittiin satunnaisesti vikaantumistodennäköisyyden arvo ja suoritettiin vikapuumallin mukainen laskenta. Simulaatio toistettiin 1000 kertaa. Laskenta suoritettiin Excelissä ja seuraavaksi käydään läpi laskennan matemaattinen tausta ja laskennan kulku.



Kuva 21. Kolmiojakauma. (Wright 2017)

Kolmion pinta-ala on siis:

$$0,5 * (b - a) * h = 1 \quad (11)$$

Ja edelleen:

$$h = \frac{2}{(b-a)} \quad (12)$$

Todennäköisyys sille, että $x < c$:

$$P(x < c) = 0,5 * (c - a) * h = 0,5 * (c - a) * \frac{2}{b-a} = \frac{c-a}{b-a} \quad (13)$$

Mikäli $a < x_1 < c$, saadaan $P(x_1)$ verrannosta:

$$\frac{P(x_1)}{x_1 - a} = \frac{h}{c - a} \quad (14)$$

Mistä seuraa:

$$P(x_1) = \frac{2 * (x_1 - a)}{(b - a) * (c - a)} \quad (15)$$

Vastaavasti mikäli $c < x_2 < b$:

$$P(x_2) = \frac{2 * (b - x_2)}{(b - a) * (b - c)} \quad (16)$$

Kertymäfunktiot ovat siten:

$$CDF(x_1) = P(x_1) * \frac{(x_1 - a)}{2} = \frac{(x_1 - a)^2}{(b - a) * (c - a)} \quad (17)$$

Ja vastaavasti:

$$CDF(x_2) = 1 - \frac{(b - x_2)^2}{(b - a) * (b - c)} \quad (18)$$

Normaalijakaumaa noudattaville muuttujille voitaisiin käyttää Excelin RAND-funktiota todennäköisyyksien generoimiseen ja NORM:INVERSE-komennolla generoida satunnaiset arvot muuttujalle x . Kolmiojakaumaa noudattavalle muuttujalle tällaista komentoa ei suoraan ole, vaan ylläoleville kertymäfunktioille tulee luoda käänteisfunktiot. Tätä varten voidaan generoida satunnaiset todennäköisyydet (P_1 ja P_2) käyttäen RAND-funktiota ja asettaa ne yhtä suuriksi kertymäfunktioiden kanssa. Sitten käyttäen algebraa voidaan ratkaista x molemmissa tapauksissa.

Ensimmäiselle osalle:

$$P_1 = \frac{(x_1 - a)^2}{(b - a) * (c - a)} \quad (19)$$

$$P1 * (b - a) * (c - a) = (x_1 - a)^2 \quad (20)$$

$$\sqrt{P1 * (b - a) * (c - a)} = x_1 - a \quad (21)$$

$$x_1 = a + \sqrt{P1 * (b - a) * (c - a)} \quad (22)$$

Toiselle osalle:

$$P2 = 1 - \frac{(b-x_2)^2}{(b-a)*(b-c)} \quad (23)$$

$$P2 * (b - a) * (b - c) = (b - a) * (b - c) - (b - x_2)^2 \quad (24)$$

$$(b - x_2)^2 = (b - a) * (b - c) - P2 * (b - a) * (b - c) \quad (25)$$

$$(b - x_2) = \sqrt{(1 - P2) * (b - a) * (b - c)} \quad (26)$$

$$x_2 = b - \sqrt{(1 - P2) * (b - a) * (b - c)} \quad (27)$$

Excelissä voidaan nyt IF-komennolla määrittää, kumpaa lauseketta muuttujan arvon laskemiseen tulee käyttää. Tätä varten käytetään kertymäfunktion arvoa muuttujalle $x = c$ ratkaisupisteinä.

$$CDF(c) = \frac{c-a}{b-a} \quad (28)$$

Jos RAND-funktiolla generoitu kertymäfunktion arvo $P(x) < CDF(c)$, käytetään muuttujan x_1 ratkaisemiseksi esitettyä lauseketta ja muussa tapauksessa muuttujan x_2 ratkaisemiseksi esitettyä lauseketta.

Näin on saatu yksittäiselle komponentille poimittua vikaantumistodennäköisyys satunnaisesti todennäköisyysjakaumasta. Sama toistetaan jokaiselle komponentille ja saaduilla komponenttien vikaantumistodennäköisyyksien arvoilla suoritetaan vikapuun mukainen laskenta. Simulaatio toistettiin tuhat kertaa ja sprinklerilaitteiston vikaantumistodennäköisyydeksi saatiin 0,3 – 1,0 % mediaanin ollessa 0,6 %. Laitteiston luotettavuus olisi siis 99,4 % (99,0 – 99,7 %).

4.3 Tulosten vertailu ja niihin liittyvät epävarmuudet

Systeemipohjaisessa PRONTO-aineistoon perustuvassa tutkimuksessa saatiin sprinklerilaitteistojen luotettavuudeksi 98,1 % ja komponenttipohjaisessa vikapuun avulla toteutetussa tutkimuksessa 99,4 %. Yksi systeemipohjaisen tutkimuksen alhaisempaa luotettavuusprosenttia selittävä tekijä on se, että joissain PRONTO:ssa epäonnistuneiksi merkityissä tapauksissa laitteiston toimintaa ei ollut kuvattu sen tarkemmin. Osaan näistä ta-

pauksista saatiin lisätietoja rakennusten käyttäjiltä ja kaikissa niissä tapauksissa osoittautui, että joko tulipalo oli sellainen, että laitteiston ei olisi pitänytkaan reagoida tai sitten sprinklerilaitteisto oli rajoittanut paloa. Muutamassa tapauksessa lisätietoja ei saatu, joten ne laskettiin tutkimuksessa epäonnistuneiksi tapauksiksi. Todennäköisesti kuitenkin ainakin osa näistä tapauksista ovat todellisuudessa sellaisia, joissa sprinklerilaitteiston ei olisi pitänytkaan reagoida. Tutkimuksen otanta jäi melko pieneksi (776 tapausta), joten tällaisten yksittäisten tapausten vaikutus lopputulokseen voi olla merkittävä.

Komponenttipohjaiseen tutkimukseen käytetyt lähtöarvot eli komponenttien vikaantumistodennäköisyydet vaihtelivat todella paljon. Lopputuloksena saadun sprinklerilaitteiston luotettavuusprosentin vaihteluväli jäi kuitenkin varsin pieneksi (99,0 – 99,7 %). Monte Carlo -simulointi antaa sitä tarkemman lopputuloksen, mitä useammin simulointi toistetaan. Tähän tutkimukseen simulointi toistettiin 1000 kertaa. Tuloksen luotettavuuden arvioimiseksi vastaava simulointi toistettiin 10 000 kertaa. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden mediaani oli edelleen 99,4 % vaihteluvälin ollessa 98,9 – 99,8 %, joten 1000 toiston simulointia voidaan pitää riittävän tarkkana.

Komponenttipohjaisen tutkimuksen vikapuu on koottu sprinklerilaitteistojen tyypillisistä komponenteista eikä sitä voi suoraan soveltaa minkään rakennuskohteen sprinklerilaitteiston arviointiin. Luotettavuusarviointi tulee tehdä aina kohdekohtaisesti kyseisen kohteen sprinklerilaitteiston kytkentäkaavion pohjalta tehtyyn vikapuuhun perustuen. Yksittäisistä komponenteista pumppujen vikaantumistodennäköisyydet ovat selvästi suurimmat, joten on perusteltua käyttää vähintään kahta rinnakkaista pumppua. Erityisesti dieselpumpun käyttö ainoana pumppuna laskisi laitteiston luotettavuutta selvästi. Jos laitteiston ainoana pumppuna olisi yksi sähköpumppu, olisi laitteiston luotettavuus 98,9 % (98,1 – 99,6 %). Yhdellä dieselpumpulla luotettavuus jäisi 96,7 %:iin (91,3 – 99,4 %).

Systeemipohjaisessa tutkimuksessa havaittiin, että suurin osa vikaantumisista johtui puutteellisesta laitteiston kunnossapidosta. Myös yhdysvaltalaisissa Hallin tutkimuksissa varsinaisesti vikaantuneista komponenteista johtuneet epäonnistumiset olivat hyvin harvinaisia. Jos puutteellisesta kunnossapidosta aiheutuvat vikaantumiset saataisiin kitkettyä pois, nousisi sprinklerilaitteistojen luotettavuus jopa korkeammaksi kuin nyt komponenttipohjaisessa tutkimuksessa saatu tulos.

5. KOMPONENTTIPOHJAISEN TUTKIMUKSEN SOVELLUS RAKENNUSKOHTEISIIN

Sprinklerilaitteiston luotettavuudella on merkittävä vaikutus sallittuihin suunnitteluratkaisuihin rakennusten palomitoituksessa. Tämän osoittamiseksi sovellettiin komponenttipohjaista luotettavuusarviota kahteen rakennuskohteeseen. Kohteiksi valikoituivat puukerrostalo ja teräsrakenteinen kauppakeskus.

5.1 Puukerrostalo

Tarkasteltavana kohteena on 14-kerroksinen puukerrostalo. Ympäristöministeriön asetuksen 848/2017 taulukon 3 mukaan yli 28 m korkean puurakenteisen rakennuksen paloturvallisuutta ei voida osoittaa käyttäen taulukkomitoitusta. Maankäyttö- ja rakennuslain kohdassa 117 b § (21.12.2012/958) esitettyjen rakennusten paloturvallisuuden kannalta olennaisten teknisten vaatimusten osoitetaan täyttyvän oletettuun palonkehitykseen perustuvalla mitoituksella. Samalla näytetään, millainen merkitys sprinklerilaitteiston luotettavuudella on palomitoituksessa.

5.1.1 Kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuus

Puukerrostalon sprinklerilaitteiston luotettavuus määritettiin vikapuumallin avulla. Vikapuun muodostamisen lähtökohtana käytettiin sprinklerilaitteiston kytkentäkaaviota. Vikapuuhun poimittiin kytkentäkaaviosta kaikki komponentit, jotka voisivat mahdollisesti aiheuttaa laitteiston vikaantumisen. Vikapuu on esitetty liitteessä A.

Kohteen sprinklerilaitteiston suoritustaso vastaa standardin SFS-EN 12845 OH1-luokkaa. Taulukon 15 mukaan OH1-luokassa todennäköisyys sille, että avautuneita sprinklereitä on mitoitusarvoa enemmän, on melko suuri. Mikäli laitteiston tehokkaan toiminnan epäonnistumisen arviointiin käytettäisiin suoraan tätä todennäköisyyttä, muodostaisi se kohtuuttoman suuren osan kaikista laitteiston vikaantumisista. Todellisuudessa mitoitusarvon ylittävä avautuneiden sprinklereiden määrä ei kuitenkaan johda aina palonhallinnan epäonnistumiseen. Tarkasteltavassa kohteessa asunnot ovat pieniä, joten sprinklereitä on palo-osastoa kohden vain muutama. Riskiä siitä, että avautuneita sprinklereitä olisi mitoitusarvoa enemmän, ei siis käytännössä ole, joten käytetään laitteiston tehokkaan sammutuksen arviointiin taulukon 15 mukaista OH3-luokan arvoa.

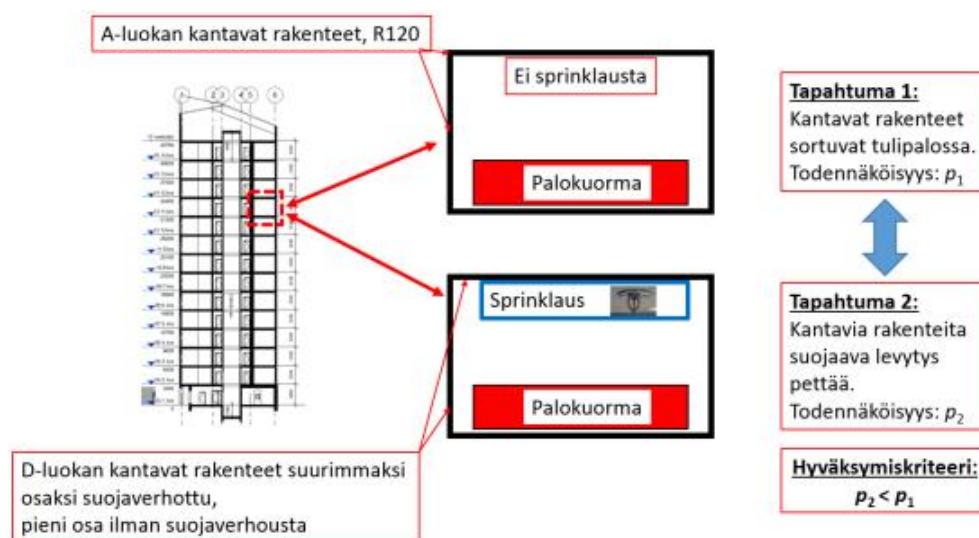
Sprinklerilaitteiston luotettavuudeksi saatiin 99,4 % vaihteluvälin ollessa 99,1 – 99,7 %. Koska tehokkaan sammutuksen arvioinnissa tehty yksinkertaistus on hieman epävarma, käytetään laskennassa luotettavuuden minimiarvoa 99,1 %. Vertailun vuoksi katsotaan, millaiseen suunnitteluratkaisuun päädyttäisiin, jos luotettavuus olisi 96 %.

5.1.2 Suunnitteluratkaisu

Suunnitellun ratkaisun on oltava vähintään yhtä paloturvallinen kuin asetuksen 848/2017 luokkiin ja lukuarvoihin perustuva ratkaisu vastaavalle A-luokan materiaaleista tehdylle rakennukselle. Vertailu tehdään riskianalyysillä, jossa määritetään seuraavien tapahtumien todennäköisyydet ja toistumisajat:

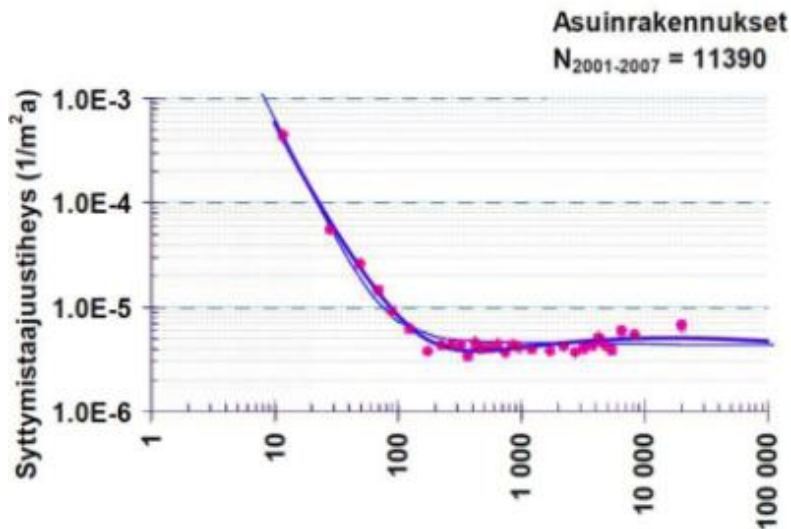
- Kohteessa esiintyy palotapahtuma, joka voi aiheuttaa kantavia rakenteita suojaavan suojaverhouksen pettämisen siten, että palavaa puurakennetta voisi osallistua paloon lisäten palokuormaa ja johtaen lopulta mahdollisesti rakenteelliseen sortumaan.
- Vastaavassa asetuksen 848/2017 luokkien ja lukuarvojen mukaisessa A-luokan tarvikkeista rakennetussa rakennuksessa esiintyy palotapahtuma, joka voi aiheuttaa kantavien rakenteiden sortumisen.

Edellä mainittujen tapahtumien todennäköisyyksiä vertaamalla voidaan määrittää tähän tapaukseen soveltuva mitoituspalokuorman arvo eri sprinklerilaitteiston luotettavuuden arvoilla. Mitoituspalokuorman arvoon lisätään näkyvillä olevan puurakenteen hiiltymästä tuleva lisäys. Seuraavassa kuvassa (Kuva 22) on havainnollistettu riskianalyysin perusidea.



Kuva 22. Riskianalyysin perusidea. (Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy 2017)

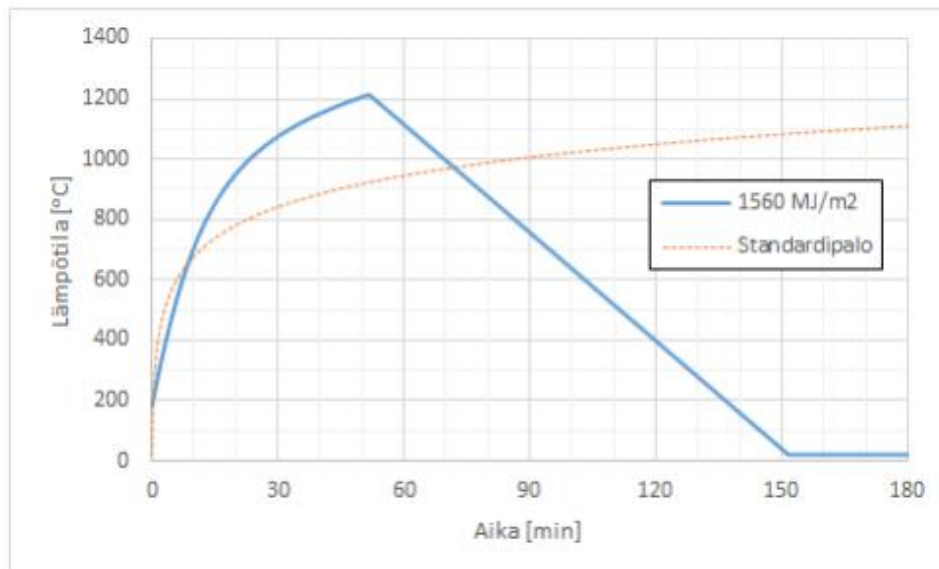
Kohteen pinta-ala on n. 3700 m². VTT:n ja Pelastusopiston tekemän tutkimuksen mukaan tämän kokoisen asuinkerrostalon syttymistäajuustiheys on $4,8 \cdot 10^{-6}$ 1/m²a. (Tillander et al. 2009)



Kuva 23. Asuinrakennusten syttymistaajuustiheyden f' riippuvuus kerrosalasta. (Tillander et al. 2009)

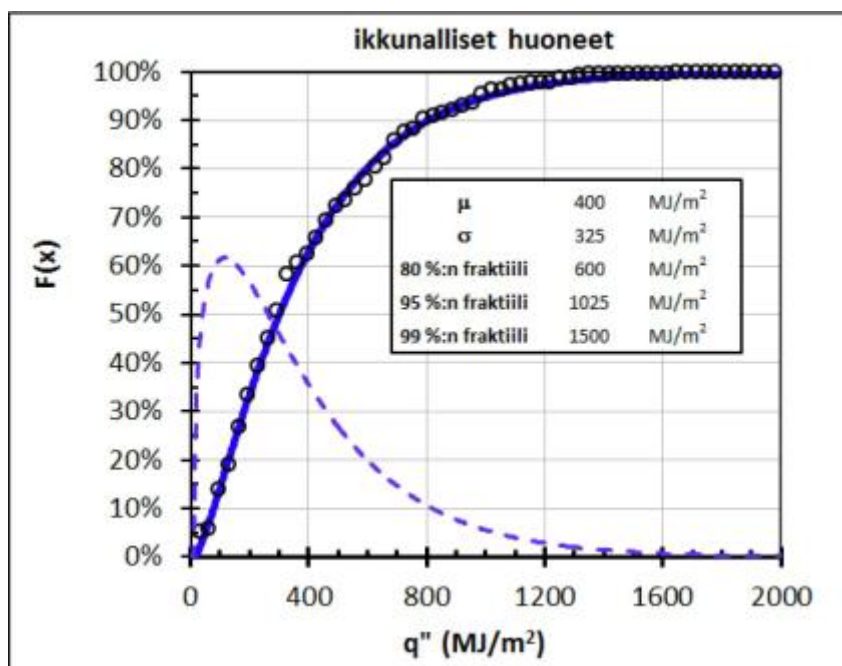
Kohteen syttymistaajuudeksi saadaan $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/m}^2\text{a} \cdot 3700 \text{ m}^2 = 17,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/a}$ eli syttymiä tapahtuu keskimäärin kerran noin 56 vuodessa. Alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyytenä käytetään VTT:n tutkimuksen mukaista arvoa 47 %.

A2-s1, d0-luokan tarvikkeista rakennetun sprinklaamattoman vastaavan kerrostalon kantavien rakenteiden palonkestävyysluokkavaatimus on R120 eli niiden on kestävä 120 minuuttia standardipaloa sortumatta. Laskelmissa käytetään asuntoa, jonka pinta-ala on $47,5 \text{ m}^2$ ja vaipan pinta-ala $172,3 \text{ m}^2$. Kauriala on määrittänyt vertailuratkaisun kriittisen palokuorman tiheyden siten, että mitoituspalon palorasitus 120 minuutin aikana vastaa 120 minuutin standardipaloa. Palokuorman tiheys on tällöin 1560 MJ/m^2 .



Kuva 24. 120 minuutin standardipaloa vastaava mitoituspalo asunnossa, kun rakennus on tehty A-luokan rakenteista. (Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy 2017)

Suomen asuinrakennusten palokuormia on määritetty osana palokuolemien ehkäisyohjelmaa (Keski-Rahkonen et al. 2011). Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 25) on esitetty edellä mainitun lähteen tilastotietojen perusteella muodostettu palokuorman tiheyden jakauma (katkoviiva) sekä jakauman kertymäfunktio (yhtenäinen viiva). Kuvaajassa $F(x)$ kuvaa todennäköisyyttä sille, että rakenteiden kannalta kriittinen palokuorma ei ylity eli palokuormafraktiilia $p_{pk,cr}$.



Kuva 25. Suomen asuinrakennusten palokuorman tiheyden jakauma ja jakauman kertymäfunktio ikkunallisten huoneiden osalta. Vaaka-akselilla palokuorman tiheys ja pystyakselilla palokuorman tiheyden fraktiili (Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kaurialä Oy 2015)

Vertailuratkaisussa kriittinen palokuorman tiheys oli 1560 MJ/m². Tämä vastaa kuvan mukaisesti 99,3 %:n palokuorman tiheyden fraktiilia eli kriittinen palokuorma ylittyy 0,7 % tapauksissa. Nyt voidaan laskea kuinka todennäköisesti A-luokan rakenteista tehdyssä vertailukohteessa syttymä johtaa rakenteita uhkaavaan paloon. Luvussa 2.4.2 esitettiin kaava (Kaava 3) tämän laskemiseen.

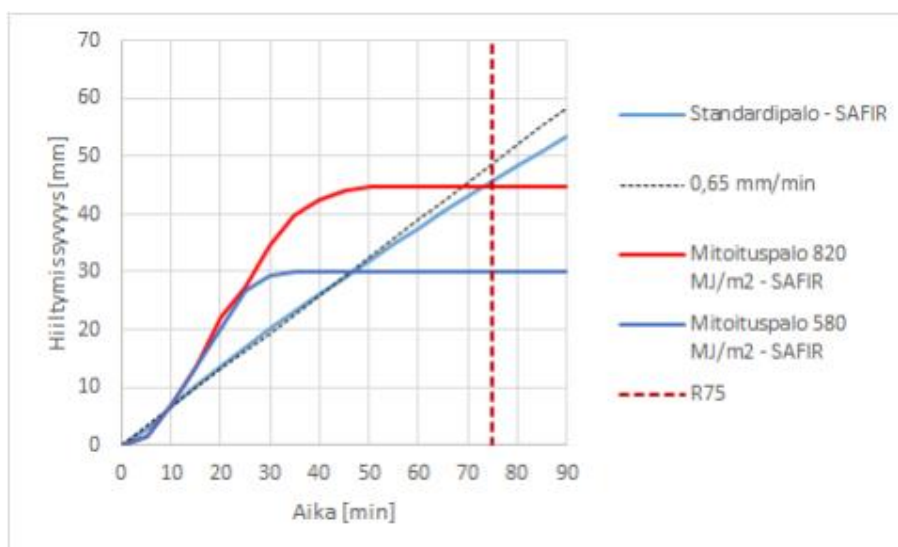
Tuloksena saadaan, että 0,37 % syttymistä kehittyy rakenteita uhkaavaksi paloksi. Syttymien toistumisajan ollessa 56 vuotta, rakenteita uhkaava palo sattuu keskimäärin kerran noin 15 000 vuodessa. Vertailukohde on siis asetuksen 848/2017 luokkien ja lukuarvojen mukainen eli sen turvallisuustason voidaan katsoa olevan riittävä.

Nyt voidaan siis verrata tarkasteltavaa puurakenteista kohdetta vertailukohteen turvallisuustasoon. Sprinklatuissa kohteissa myös sprinklerilaitteiston luotettavuus vaikuttaa rakenteita uhkaavan palon todennäköisyyteen Kaavan 6 mukaisesti. Vikapuulaskennalla saatiin selville kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuuden olevan yli 99 % (99,1 % - 99,7%). Käytetään laskennassa luotettavuuden minimiarvoa 99,1 %.

Kaavan 7 mukaan hyväksyttävään turvallisuustasoon päästään, kun käytetään mitoituspalokuormana 23 %:n fraktiilia, joka vastaa arvoa 180 MJ/m^2 . Tähän arvoon tulee lisätä vielä näkyvillä olevan puun hiiltymästä tuleva osuus.

Suojatun kantavan rakenteen suojaverhouksen on suojattava puurakennetta koko mitoituspalon ajan. Näin kantavasta rakenteesta ei muodostu lisää palokuormaa. Osa kantavasta rakenteesta jätetään suojaamatta ja tämän rakenteen palava osa lisätään palokuormaan. Tarkastellaan, kuinka iso osa suojaamatonta puurakennetta voidaan jättää näkyviin siten, ettei siitä muodostu liikaa palokuormaa. Oletetaan, että kohteen kantavat rakenteet suojataan asuntojen sisäpinnoissa seinien osalta kahdella normaalilla 13 mm kipsilevyllä ja välipohjien osalta yhdellä 15 mm palokipsilevyllä sekä yhdellä normaalilla 13 mm kipsilevyllä. Suomen kansallisen liitteen mukaan murtumishetki standardipalossa on yllämainitulle seinärakenteen suojaukselle 40 minuuttia ja välipohjarakenteen suojaukselle 45 minuuttia (Ympäristöministeriö. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1995 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Rakenteiden palomitoitus.). Valitaan asuntojen kriittiseksi palokuormaksi palokuorma, joka voi johtaa 40 minuutin standardipaloa vastaavaan mitoituspaloon. Palosimulointien perusteella kriittinen palorasitus vastaa palokuorman tiheyttä 580 MJ/m^2 . Palokuorman tiheyden fraktiilina tämä tarkoittaa 78,7 %:n fraktiilia. (Kauriala)

Tähän tutkimukseen ei tehty erikseen hiiltymälaskelmia vaan sovellettiin luottamuksellisen lähteen (Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy 2017) laskelmia. Seuraavasta kuvaajasta (Kuva 26) huomataan, että puurakenteen hiiltyminen pysähtyy 580 MJ/m^2 mitoituspalossa 30,1 mm:n kohdalle. Vertailu standardipalorasitukseen osoittaa, että tämä vastaa noin 47 minuutin standardipalorasitusta. Tällä perusteella voidaan todeta, että rakenteen mitoittaminen 60 minuutin standardipalolle (R60) vastaa tilannetta, jossa rakenne kestää mitoituspalon kokonaisuudessaan mukaan lukien hiipumisvaihe.



Kuva 26. Puurakenteen hiiltymäsyvyydet mitoituspalossa sekä standardipalossa. (Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy 2017)

Alkutilanteen mitoituspalo kuorman ollessa 180 MJ/m^2 ja kriittisen palo kuorman 580 MJ/m^2 , näkyville jäävästä puupinnasta saa kertyä palo kuormaa enintään 400 MJ/m^2 . Käytetään laskelmassa seuraavia lähtöarvoja:

- Hiiltymissyvyys $30,1 \text{ mm}$
- Puun lämpöarvo $17,5 \text{ MJ/kg}$
- Puun tiheys 470 kg/m^3
- Asunnon pinta-ala $47,5 \text{ m}^2$
- Vaipan pinta-ala $172,3 \text{ m}^2$

Suojaamattomasta puupinnasta aiheutuu siis palo kuormaa 248 MJ/m^2 jokaista suojaamatonta pintaneliötä kohden. Asuinneliötä kohden palo kuormaa saa kertyä suojaamattomasta puupinnasta siis 400 MJ/m^2 eli yhteensä $19\,000 \text{ MJ}$ koko asunnossa. Näin ollen suojaamatonta puupintaa voidaan jättää 77 m^2 eli 44% vaipan pinta-alasta.

Tarkastellaan vertailun vuoksi tilannetta, jossa sprinklerilaitteiston luotettavuus olisi 96% . Tällöin kaavan 7 mukaan palo kuormafraktiili on 83% mikä tarkoittaa mitoituspalo kuorman arvoa 650 MJ/m^2 . Huomataan, että tällöin ei voida hyödyntää aiemmin käytettyä palosuojausta, koska kriittinen palo kuorma 580 MJ/m^2 ylittyy, vaikka suojaamatonta puupintaa ei olisi lainkaan. Palosuojausta tulee siis vahvistaa. Kun sekä seinärakenteet että välipohjarakenteet suojataan kahdella 15 mm palokipsilevyllä, murtumishetki on yli 60 minuuttia (Kansallinen liite). Kriittiseksi palo kuormaksi valitaan siis palo kuorma, joka voi johtaa 60 minuutin standardipaloa vastaavaan mitoituspaloon eli 820 MJ/m^2 .

Kuvasta 26 huomataan, että 820 MJ/m^2 mitoituspalossa puurakenteen hiiltyminen pysähtyy $44,6 \text{ mm:n}$ kohdalle. Lisäksi havaitaan, että rakenteen mitoittaminen 75 minuutin standardipalolle (R75) vastaa tilannetta, jossa rakenne kestää mitoituspalon kokonaisuudessaan mukaan lukien hiipumisvaihe. Kriittisen palo kuorman ja alkutilanteen mitoituspalo kuorman erotus on tässä tapauksessa 170 MJ/m^2 , minkä verran näkyville jäävästä puupinnasta saa siis kertyä palo kuormaa. Koko asunnossa tämä tarkoittaa 8075 MJ . Hiiltymissyvyyden ollessa suurempi, suojaamattomasta puupinnasta aiheutuu tässä tapauksessa palo kuormaa 367 MJ/m^2 jokaista suojaamatonta pintaneliötä kohden. Suojaamatonta puupintaa voidaan nyt jättää 22 m^2 eli 13% vaipan pinta-alasta.

Sprinklerilaitteiston luotettavuuden ollessa laskettu $99,1 \%$ tällä raskaammalla suojauksella näkyville jäävästä puupinnasta saisi aiheutua palo kuormaa 640 MJ/m^2 eli yhteensä $34\,000 \text{ MJ}$. Silloin suojaamatonta puupintaa voisi jäädä 83 m^2 eli 48% vaipan pinta-alasta. Seuraavan taulukkoon (Taulukko 16) on koottu tulokset sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutuksesta sallittuun suunnitteluratkaisuun. Sprinklerilaitteiston luotettavuudella on siis merkittävä vaikutus niin hyväksytyn palosuojauksen raskauteen ja sitä kautta kustannuksiin kuin myös näkyvän puupinnan sallittuun määrään.

Taulukko 16. Puukerrostalokohteen sallitut suunnitteluratkaisut sprinklerilaitteiston luotettavuuden eri arvoilla.

| Sprinklerilaitteiston luotettavuus | Sisäpintojen palosuojaus | |
|------------------------------------|---|--|
| | Seinärakenteet: 2 x kipsilevy 13 mm Välipohjarakenteet: palokipsilevy 15 mm + kipsilevy 13 mm | Seinärakenteet: 2 x palokipsilevy 15 mm Välipohjarakenteet: 2 x palokipsilevy 15 mm |
| 99,1 % | Kantavien puurakenteiden palonkestävyysluokkavaatimus: R60 Suojaamatonta puupintaa: 44 % | Kantavien puurakenteiden palonkestävyysluokkavaatimus: R75 Suojaamatonta puupintaa: 48 % |
| 96 % | Ei mahdollinen | Kantavien puurakenteiden luokkavaatimus: R75 Suojaamatonta puupintaa: 13 % |

Sprinklerilaitteiston luotettavuudella on siis merkittävä vaikutus niin hyväksytyn palosuojauksen raskauteen ja sitä kautta kustannuksiin kuin myös näkyvän puupinnan sallittuun määrään. Korkeammalla sprinklerilaitteiston luotettavuudella mitoituspalokuorma jää sen verran pieneksi, että raskaammalla palosuojauksella ei saavuteta juurikaan hyötyä. Matalammalla sprinklerilaitteiston luotettavuudella kevyempi palosuojaus ei ollut mahdollinen, koska mitoituspalokuorman arvo ylitti kriittisen palokuorman, vaikka suojaamatonta puupintaa ei olisi lainkaan.

14-kerroksista puukerrostaloa ei ole mahdollista suunnitella perustuen asetuksen 848/2017 luokkiin ja lukuarvoihin. Vertailun vuoksi enintään 28 m korkeassa puukerrostalossa voidaan taulukkomitoituksessa jättää suojaamatonta puupintaa enintään 20 %, kun kantavien ja osastoivien rakenteiden palonkestävyysluokka on R60. Mikäli rakenteiden palonkestävyysluokkaa korotetaan luokkaan R90, voidaan suojaamatonta puupintaa jättää 80 %. Palonkestävyysluokassa R120 suojaamattoman puupinnan osuutta ei ole rajoitettu. (848/2017)

5.2 Teräsrakenteinen kauppakeskus

Toisena kohteena tutkitaan teräsrakenteista kauppakeskusta. Rakennuksen pinta-ala on 60 000 m² ja liiketilojen suurin palo-osasto on 40 000 m².

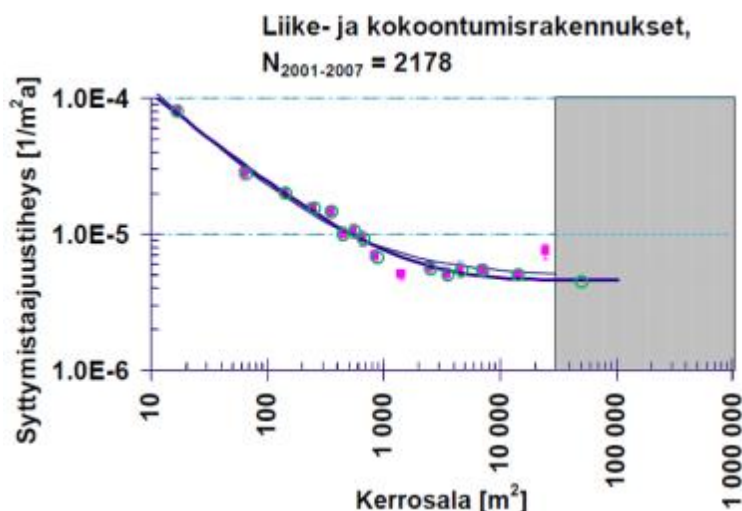
5.2.1 Kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuus

Kauppakeskuksen sprinklerilaitteiston luotettavuus määritettiin vastaavasti kuin puukerrostalon tapauksessa eli laitteiston kytkentäkaavioon perustuvalla vikapuumallilla. Kauppakeskuksen tapauksessa kytkentäkaavio sisältää enemmän komponentteja, joten laitteiston luotettavuus on hiukan huonompi. Myös se, että molemmat pumput ovat dieselpumppuja, laskee luotettavuutta verrattuna sähköpumpulla varustettuun laitteistoon.

Kohteen sprinklerilaitteiston suoritustaso vastaa standardin SFS-EN 12845 OH3-luokkaa. Tehokkaan sammuttamisen epäonnistumisen arviointiin käytetään suoraan konservatiivista Taulukon 15 OH3-luokan arvoa sille, että avautuneita sprinkleripäitä on yli mitoitusarvon. Suurin osa kohteen sprinklerilaitteistosta on märkäasennusta. Märkäasennuksen alueella laitteiston luotettavuudeksi saatiin 98,7 % vaihteluvälin ollessa 98,0 – 99,3 %. Pieni osa kohteesta on suojattu kuivajatkosasennuksella. Kuivahälytysventtiilin luotettavuus on märkähälytysventtiiliä heikompi, joten laitteiston luotettavuus tällä alueella laski hieman arvoon 98,5 % vaihteluvälin ollessa 97,6 – 99,2 %. Suurin palo-osasto on kokonaisuudessaan suojattu märkäasennuksella, joten käytetään laskennassa luotettavuuden arvoa 98,7 %. Vertailuarvona käytetään tässäkin tapauksessa luotettavuutta 96 %.

5.2.2 Suunnitteluratkaisu

VTT:n ja Pelastusopiston julkaisussa (Tillander et al. 2009) on esitelty syttymistäajuustiheyden arvoja kerrosalan funktiona liike- ja kokoontumisrakennuksissa.

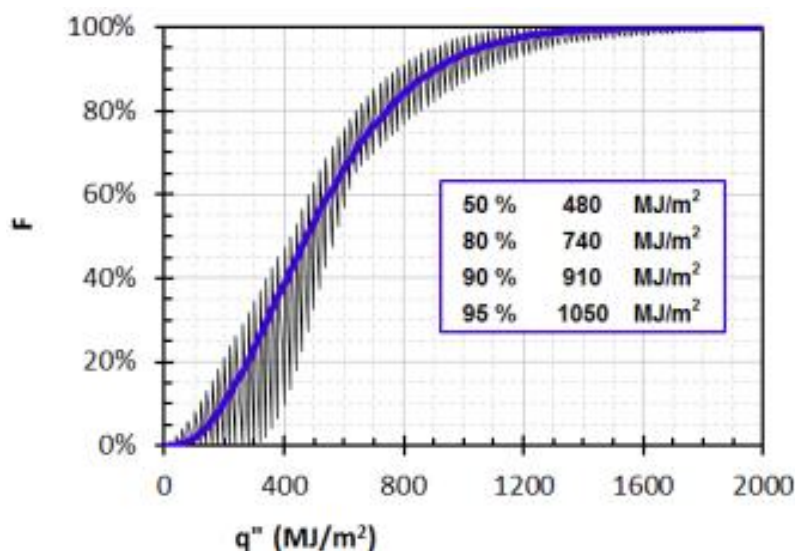


Kuva 27. Kokoontumis- ja liiketilojen syttymistäajuustiheyden riippuvuus rakennuksen kokonaisalasta. (Tillander et al. 2009)

Kuvaajasta (Kuva 27) huomataan, että syttymistäajuustiheys $60\,000\text{ m}^2$ liikerakennuksessa on $4,6 \cdot 10^{-6}\text{ 1/m}^2\text{a}$. Rakennuksen syttymistäajuus on siis $0,276\text{ 1/a}$ eli syttymien toistumisaika on 3,6 vuotta. Alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyys liikerakennuksissa on VTT:n ja Pelastusopiston tekemän tutkimuksen mukaan tilastollisesti keskimäärin 42 % (Tillander et al. 2009).

Vastaavasti kuin puukerrostalon tapauksessa, suunnitellun ratkaisun on oltava vähintään yhtä paloturvallinen kuin asetuksen 848/2017 luokkiin ja lukuarvoihin perustuva ratkaisu vastaavalle rakennukselle. Kauppakeskukset kuuluvat taulukkomitoituksessa palokuormaryhmään $600\text{--}1200\text{ MJ/m}^2$, jolloin P1-luokan rakennuksissa teräsristikot on suunniteltava vähintään palonkestävyysluokkaan R60 eli rakenteiden tulee kestää 60 minuuttia standardipaloa. (848/2017)

Vastaavan kauppakeskuskohteen palosimuloinnissa havaittiin 60 minuutin standardipalon vastaavan 1000 MJ/m^2 mitoituspalo kuormaa. Sovelletaan tätä arvoa tarkasteltavaan kohteeseen, jotta voidaan määrittää arvio vaaditusta turvallisuustasosta. Todellisuudessa tulisi tehdä lämpötilalaskelma, jossa huomioidaan muun muassa juuri kyseisen kohteen tilojen geometria, mutta yksinkertaisuuden vuoksi käytetään tässä tutkimuksessa tätä arviota. Jukka Hietaniemi on koonnut eri tutkimusten (Hiipakka 2010; Hööpakka 2010; Hadjisophocleous & Zalok 2003; Zalok et al. 2009; Thauvoye 2007; Thauvoye et al. 2008; SIA 81/1984; CIB 1983) tulosten sekä eurokoodin (SFS-EN 1991-1-2) mukaisia myymälöiden ja kauppakeskusten palokuorman tiheyden jakaumien kertymäfunktioita ja muodostanut niistä yhdistämällä yhden kertymäfunktion (Kuva 28). Käytetään tässä tutkimuksessa kyseistä jakaumaa palokuormafraktiilien määrittämiseen. Kuvaajassa F kuvaa todennäköisyyttä sille, että rakenteiden kannalta kriittinen palokuorma ei ylitä eli palokuormafraktiilia $p_{pk,cr}$.



Kuva 28. Kauppakeskuksen palokuorman tiheyden jakauman kertymäfunktio. (Hietaniemi 2016)

Kuvaajasta havaitaan, että 1000 MJ/m² palokuorman tiheys vastaa 94 % palokuormafraktiilia. Nyt voidaan Kaavan 3 avulla laskea, kuinka todennäköisesti vertailukohteessa sattunut syttymä johtaa teräsristikoita uhkaavaan paloon. Tuloksena saadaan, että 3,48 % syttymistä kehittyy teräsristikoita uhkaavaksi paloksi. Syttymien toistumisajan ollessa 3,6 vuotta, teräsristikoita uhkaava palo sattuu keskimäärin kerran noin 103 vuodessa. Uhkaavien palojen todennäköisyys vaikuttaa suurelta, mutta tässä arviossa ei ole huomioitu palokunnan toimintaa eikä sitä, kuinka todennäköisesti palo sattuu juuri ristikon kohdalla. Lisäksi mitoituspalkokuorman arvo perustui toisen kohteen palosimulointiin, joten se on vain arvio tässä kohteessa. Joka tapauksessa tämä arvio perustuu asetuksen 848/2017 mukaisiin luokkiin ja lukuarvoihin eli sitä voidaan pitää hyväksyttävänä turvallisuustasona verrattaessa sprinklattuun ratkaisuun, jossa ei myöskään huomioida palokunnan toimintaa eikä palon syttymiskohtaa.

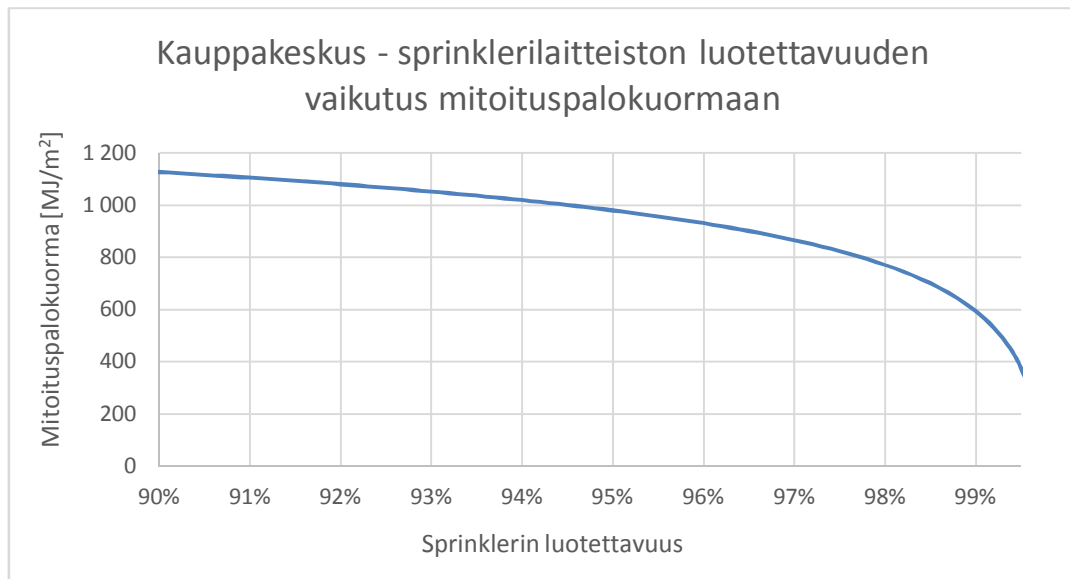
Oletetaan nyt, että hyväksyttävä todennäköisyys teräsristikoita uhkaavalle palolle on 3,48 %. Taulukkomitoituksessa kauppakeskuksen palo-osaston enimmäisala on 2400 m². Huomioidaan tämä kertomalla tarkasteltavan kohteen riskitasoa palo-osastojen suhteella. Tarkasteltavan kohteen suurin palo-osasto on 40 000 m², joten riskitaso kerrotaan luvulla 40 000/2400 = 17. Teräsristikoita uhkaavan palon todennäköisyys voidaan siis määrittää kaavalla (Kaava 29):

$$p_{uhk} = n * (1 - p_{alk}) * (1 - p_{spr}) * (1 - p_{pk,cr}) \quad (29)$$

missä n on tarkasteltavan kohteen suurimman palo-osaston ja taulukkomitoituksessa hyväksytyn palo-osaston pinta-alojen suhde. Kriittinen palokuorma voidaan nyt määrittää seuraavasti:

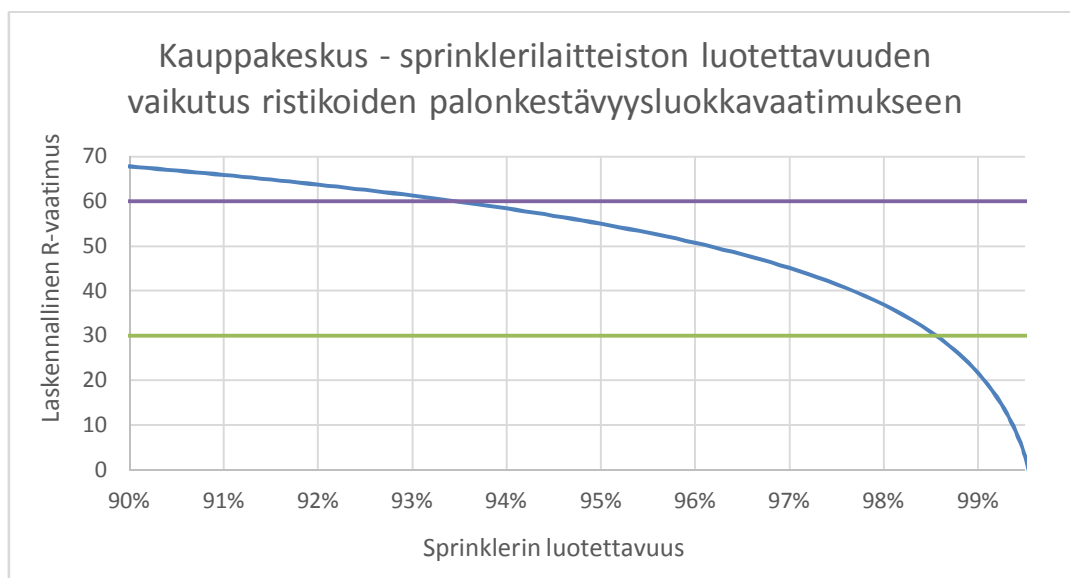
$$p_{pk,cr} = 1 - \frac{p_{uhk}}{n * (1 - p_{alk}) * (1 - p_{spr})} \quad (30)$$

Aiemmin lasketulla sprinklerilaitteiston luotettavuuden arvolla 98,7 % saadaan mitoituspalkokuorman fraktiiliksi 73 %. Mitoituspalkokuormana tämä tarkoittaa 650 MJ/m². Vastaavan kohteen palosimuloinnissa havaittiin 700 MJ/m² mitoituspalkokuorman vastaavan 30 minuutin standardipaloa eli palonkestävyysluokkaa R30, joten 98,7 %:n sprinklerilaitteiston luotettavuudella voitaisiin suunnitella palonkestävyysluokkaan R30. Vertailun vuoksi 96 % sprinklerilaitteiston luotettavuudella palokuormafraktiili olisi 91 % ja mitoituspalkokuorma 950 MJ/m², joka vastaisi suunnilleen palonkestävyysluokkaa R50 eli käytännössä rakenteet tulisi suunnitella palonkestävyysluokkaan R60. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutusta mitoituspalkokuorman suuruuteen voidaan arvioida seuraavasti: (Kuva 29)



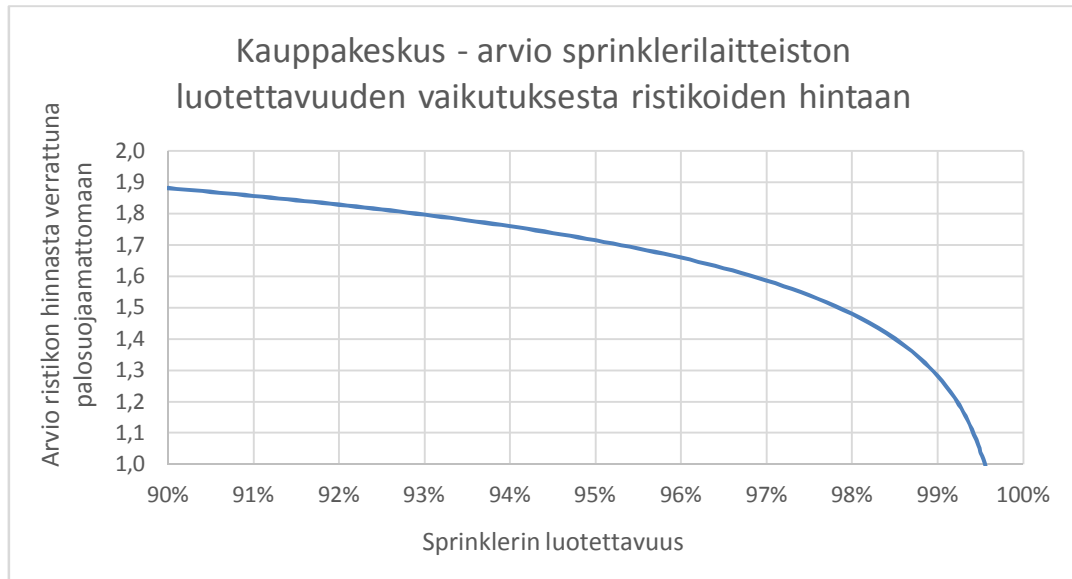
Kuva 29. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutus mitoituspalo-kuormaan.

Teräsristikoiden palonkestävyysluokkavaatimus määräytyy mitoituspalo-kuorman mukaan, joten vastaavasti voidaan arvioida sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutusta ristikoiden paloluokkavaatimukseen. (Kuva 30)



Kuva 30. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutus teräsristikoiden paloluokkavaatimukseen.

Jokinen et al. ovat tutkineet palosuojauksen vaikutusta teräsristikoiden hintaan. Tutkimuksen mukaan R30-luokan teräsristikko on noin 1,3 kertaa kalliimpi verrattuna palo-suojaamattomaan ristikkoon ja vastaavasti R60-luokan ristikko 1,8 kertaa kalliimpi palo-suojaamattomaan verrattuna. (Jokinen et al. 2016) R60-luokan ristikot ovat siis noin 1,4 kertaa kalliimpia verrattuna R30-luokan ristikoihin. Sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutusta teräsristikoiden hintaan tässä kohteessa on arvioitu seuraavassa kuvaajassa (Kuva 31).



Kuva 31. Arvio sprinklerilaitteiston luotettavuuden vaikutuksesta teräsristikoiden hintaan.

Sprinklerilaitteiston luotettavuudella voi olla siis useiden kymmenien prosenttien vaikutus teräsristikoiden kustannuksiin. Tässä kohteessa sprinklerilaitteiston luotettavuuden ollessa 98,7 %, voidaan teräsristikot suunnitella luokkaan R30, mikä tarkoittaa noin 30 % säästöä R60-luokkaan verrattuna. Lisäksi luotettavan sprinklerilaitteiston myötä mahdollistui palo-osaston kasvattaminen 40 000 m²:iin, kun taulukkomitoituksella maksimikoko palo-osastolle olisi 2400 m².

6. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tarkasteltiin rakennusten automaattisten sprinklerilaitteistojen luotettavuutta. Luotettavuutta arvioitiin sekä systeemipohjaisesti että komponenttipohjaisesti. Systeemipohjainen luotettavuusarvio perustuu sprinklerilaitteistojen toiminnan onnistumiseen toteutuneissa palotilanteissa. Tässä tutkimuksessa systeemipohjaisen luotettavuusarvion pohjana käytettiin PRONTO:n tapahtumatilastoja Suomessa sattuneista rakennuspaloista vuosilta 1996-2016.

Komponenttipohjaisessa luotettavuusarviossa pyritään määrittämään sprinklerilaitteiston kaikki mahdolliset vikaantumistavat ja muodostetaan niiden perusteella vikapuu. Vikaantumistavoille eli yleensä sprinklerilaitteiston eri komponenttien vikaantumisille määritetään todennäköisyydet, jonka jälkeen vikapuun avulla lasketaan koko laitteiston vikaantumistodennäköisyys ja sitä kautta luotettavuus. Tässä tutkimuksessa muodostettiin tyyppillisistä sprinklerilaitteistojen komponenteista koostuva vikapuu ja tehtiin sen avulla luotettavuusarvio. Komponenttien vikaantumistodennäköisyyksinä käytettiin kirjallisuudesta löytyneitä arvoja.

Lisäksi komponenttipohjaista tutkimusta sovellettiin puukerrostalon sekä teräsrakenteisen kauppakeskuksen sprinklerilaitteistojen luotettavuuden arviointiin. Näissä tapauksissa vikapuut muodostettiin kohdekohtaisesti perustuen suoraan kohteiden sprinklerilaitteistojen kytkentäkaavioihin. Puukerrostalon ja teräsrakenteisen kauppakeskuksen kohdalla osoitettiin myös, millainen merkitys sprinklerilaitteiston luotettavuudella on kohteiden paloturvallisuussuunnittelussa rakenteiden suunnittelun osalta.

6.1 Johtopäätökset

PRONTO-aineistoon perustuvassa systeemipohjaisessa tutkimuksessa päädyttiin luotettavuusarvioon 98,1 %. Lukema on melko korkea verrattuna maailmalla tehtyihin systeemipohjaisiin tutkimuksiin, mutta joukossa on myös vieläkin korkeampia arvoja. Monissa tutkimuksissa on mukana paljon tapauksia, joissa sprinklerilaitteistolla ei ole ollut edellytyksiäkään reagoida paloon esimerkiksi sen takia, että lämpötila ei ole noussut palon aikana sprinklerin reagoimisen edellyttämälle tasolle. Tällaiset tapaukset luonnollisesti laskevat luotettavuusarviossa saatua lukemaa. Kaikissa maissa sprinklerilaitteistojen toimintaa palotilanteissa ei myöskään raportoida riittävän kattavasti, että täsmällisen arvion tekeminen olisi edes mahdollista.

Tämän työn systeemipohjaiseen tutkimukseen sisältyi lopulta 776 tapausta eli otanta jäi melko pieneksi. Tämä on varsin yleinen ongelma tilastoihin perustuvissa sprinklerilaitteistojen luotettavuusarvioissa, koska sprinklerilaitteistojen reagointia vaativia tulipaloja sattuu verrattain harvoin. Tässä tutkimuksessa käytiin läpi kaikki PRONTO-tietokannasta

löytyneet yleissuojaavalla sprinklerilaitteistolla varustetuissa rakennuksissa sattuneet rakennuspalot vuosilta 1996-2016. Onnettomuudet on tilastoitu PRONTO-tietokantaan vuodesta 1996 lähtien, joten suuremman otannan kerääminen ei käytännössä ollut mahdollista. Osassa tapauksissa sprinklerilaitteiston toiminnan onnistuminen oli merkitty PRONTO:ssa selvästi virheellisesti, joten kaikkien tapausten onnettomuus- ja rakennusselosteet piti käydä yksitellen läpi. Näin ollen suurempi otanta olisi käynyt myös varsin työlääksi.

Joissain tapauksissa sprinklerilaitteiston toiminta oli merkitty PRONTO:ssa epäonnistuneeksi, mutta onnettomuus- tai rakennusselosteessa ei ollut kuvattu laitteiston toimintaa lainkaan. Näihin tapauksiin yritettiin saada lisätietoja rakennusten käyttäjiltä. Osoittautui, että kaikissa tapauksissa joihin lisätietoja saatiin, laitteisto oli toiminut suunnitellusti eli joko rajoittanut paloa tai sitten laitteiston ei olisi edes pitänytkaan reagoida. Muutamaan tapaukseen lisätietoja ei kuitenkaan saatu ja ne laskettiin tutkimuksessa epäonnistuneiksi tapauksiksi. Mikäli kaikki tapaukset olisi saatu selvitettyä, niin luotettavuusarvio olisi siis todennäköisesti vielä hieman noussut.

Suurin osa epäonnistuneista tapauksista johtui sprinklerilaitteiston puutteellisesta ylläpidosta. Laitteiston tarkoituksenmukainen toiminta edellyttääkin jatkuvaa toimintakunnossa olemista. Sprinklerilaitteiston elinkaaren kattavasta toimintakyvystä huolehditaan säännöllisellä ylläpidolla. Ylläpitoon kuuluvat laitteiston toimintavalmiuden valvonta, laitteiston hoito ja huolto, laitteiston tehokkaan toiminnan varmistaminen tulipalossa sekä tehtyjen toimenpiteiden ja tapahtumien kirjaaminen. Laitteiston ylläpito tulee suorittaa kunnossapito-ohjelman mukaisesti. Finanssialan Keskusliiton vuonna 2007 julkaisemassa kunnossapito-ohjelman laadintaohjeissa on annettu selkeät ohjeet laadukkaaseen kunnossapito-ohjelman laatimiseksi.

Systeemipohjaiset luotettavuusarviot koostuvat aina lukuisista erilaisista sprinklerilaitteistoista, joten komponenttipohjainen menetelmä soveltuu paremmin yksittäisen kohteen sprinklerilaitteiston luotettavuuden arviointiin. Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa käytettävän vikapuun tulisi vastata aina mahdollisimman hyvin kohteen sprinklerilaitteiston kytkentäkaaviota. Käytännössä kohteen riskianalyysia tehtäessä tarkkaa kytkentäkaaviota ei ole yleensä vielä saatavilla. Tällöin vikapuu täytyy muodostaa perustuen niihin tietoihin, joita laitteistosta on jo olemassa. Tässä tutkimuksessa esitettyyn vikapuuhun koottiin sprinklerilaitteistossa tyypillisesti esiintyviä komponentteja ja sillä päästiin luotettavuusarvioon 99,4 %. Puukerrostalon ja teräsrakenteisen kauppakeskuksen sprinklerilaitteistojen luotettavuusarvioiden vikapuut perustuivat suoraan kohteiden laitteistojen kytkentäkaavioihin. Puukerrostalon tapauksessa saatiin luotettavuuden arvioksi 99,1 % ja teräsrakenteisessa kauppakeskuksessa 98,7 %.

Komponenttipohjaisessa tutkimuksessa haastavimmaksi osoittautui komponenttien vikaantumistietojen kerääminen vikapuuta varten. Vikaantumistodennäköisyyksiä oli saatavilla joillekin komponenteille melko vähän ja todennäköisyyksien arvot vaihtelivat eri

lähteiden välillä todella paljon. Osassa tutkimuksista otannat komponenttien vikaantumistietojen määrittämiseksi olivat varsin pieniä ja kaikkiin tutkimuksiin ei ollut pääsyä, joten tietoja vikaantumistodennäköisyyksien määrittämistavoista ei ollut saatavilla. Koska eri lähteiden luotettavuuden arviointi oli haastavaa, päädyttiin tutkimukseen ottamaan mukaan kaikki kirjallisuudesta löytyneet arvot. Löytyneistä vikaantumistodennäköisyyksistä muodostettiin komponentteittain kolmiojakaumat, joista Monte Carlo -simuloinnilla poimittiin vikaantumistodennäköisyydet vikapuuhun. Simulointi toistettiin 1000 kertaa. Lähtöarvojen ollessa epätarkat osoittautui Monte Carlo -simulointi erinomaiseksi menetelmäksi sprinklerilaitteiston luotettavuuden määrittämiseen. Vaikka yksittäisten komponenttien vikaantumistodennäköisyyksien arvot poikkesivat todella paljon, muodostui koko laitteiston luotettavuusarvion vaihteluväli varsin pieneksi. Yleisessä tapauksessa vaihteluväli oli 99,0 – 99,7 %, puukerrostalon laitteistolla 99,1 – 99,7 % ja kauppakeskuksen laitteistolla 98,0 – 99,3 %.

Komponenttipohjaisessa tarkastelussa tutkittiin myös, millainen merkitys pumppujen määrällä on laitteiston luotettavuuteen. Varsinkin dieselpumput ovat investointikustannuksiltaan melko kalliita ja ylläpidon kannalta haastavia, joten riskianalyysia tehtäessä kannattaa tutkia miten kustannukset jakautuvat korkeamman luotettavuuden, mutta kalliimman laitteiston ja rakenteissa saatavien säästöjen välillä. Todennäköisesti ei ole tarkoituksenmukaista maksimoida laitteiston luotettavuutta esimerkiksi useilla pumpuilla, koska kustannukset ja ylläpidon vaatimukset kasvaisivat kohtuuttomasti.

Tutkimuksen lopuksi havainnollistettiin sprinklerilaitteiston luotettavuuden merkitystä osana rakennusten toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua. Pieneltäkin vaikuttava ero sprinklerilaitteiston luotettavuudessa voi olla merkittävä paloturvallisuussuunnittelua tehtäessä. Korkeilla luotettavuuden arvoilla, vaikka ero olisi vain muutaman prosenttiyksikön, tarkoittaa se vikaantumisen todennäköisyyksiksi käännettynä suurta suhteellista eroa. Tämä selittää suurta merkitystä riskianalyysin tuloksiin. Esimerkiksi, jos sprinklerilaitteiston luotettavuus on 99 %, niin vikaantumisen todennäköisyys on 1 % ja vastavasti 96 %:n luotettavuudella 4 % eli nelinkertainen. Luotettavuusarvon suuren merkityksen vuoksi luotettavuusarvio on tehtävä kohdekohtaisesti ja laitteiston ylläpidolla on huolehdittava, että luotettavuus säilyy korkeana laitteiston koko elinkaaren ajan.

6.2 Jatkotutkimustarpeet

Tilastollisten tutkimusten tekemistä helpottaisi, jos PRONTO:ssa olisi valmiiksi arvioitu oliko palo sellainen, että sprinklerilaitteiston olisi siihen pitänyt reagoida. Tällä hetkellä PRONTO:ssa on sammutuslaitteiston toiminnan onnistumiselle kategoriat: sammutti, rajoitti, laitteiston toiminta puutteellista ja laitteisto ei toiminut. Vaihtoehtoihin voisi lisätä esimerkiksi kategorian ”laitteiston toimintaa ei vaadittu”, johon kuuluisi esimerkiksi palot, joissa lämpötila ei noussut laitteiston reagoinnin edellyttämälle tasolle ja palot, jotka sattuivat suojatun alueen ulkopuolella. Tällä hetkellä kaikki tapaukset pitää käydä yksitellen läpi ja suurin osa tapauksista on sellaisia, joissa sprinklerilaitteiston reagointia ei

vaadittu. Tarkempia arvioita varten myös laitteiston toimintaa palotilanteessa voisi kuvata tarkemmin.

Kirjallisuudesta löytyneet komponenttien vikaantumistiedot poikkesivat todella paljon eri lähteiden välillä, joten komponenttien luotettavuutta olisi syytä tutkia lisää. Osa tutkimuksista on myös jo varsin vanhoja, joten komponenttien kehittyessä myös luotettavuus on voinut parantua. Komponenttien vikaantumistietojen tutkimustulosten yhteydessä tulisi myös esitellä millaisista vikaantumisista on ollut kyse.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin vain perinteisiä sprinklerilaitteistoja eikä korkeapaineve-sisumulaitteistoja. Samanlaista vikapuuhun perustuvaa komponenttipohjaista tutkimusta voidaan kuitenkin soveltaa myös korkeapaineve-sisumulaitteistoille, mikäli kaikkien tarvittavien komponenttien vikaantumistodennäköisyydet ovat saatavilla.

Kustannusten osalta olisi mielenkiintoista verrata minkä verran kustannukset nousevat parannettaessa laitteiston luotettavuutta esimerkiksi pumppujen määrää tai vesilähteen luotettavuutta lisäämällä. Näitä kustannuksia voisi verrata luotettavuuden parantuessa rakennusten palomitoituksessa saataviin säästöihin.

LÄHTEET

Alam, T., Beever, P. (1996). Flashover Fires - An Experimental Program. Technical Report FCRC-TR 96-07. Fire Code Reform Centre Project 4. Fire Safety System Design Solutions, Part A - Core Model & Residential Buildings.

Assemblée Plénière des sociétés d'assurance dommages (1997). APSAD.

Asuntosprinklerilaitteistot. Osa 1: suunnittelu, asentaminen ja huolto (INSTA 900-1:2013) (2014). SFS 5980. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Automatic Sprinkler Performance Tables (1970). 1970 Edition. Fire Journal 64 (1970), pp. 35-39.

Baldwin, R., North, M.A. (1971). The number of sprinkler heads opening in fires. Fire Research Note No. 886. Fire Research Station.

Beilage 2 der SIA-Dokumentation 81/1984 (1984). Brandrisikobewertung/Berechnungsverfahren SIA. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Postfach, CH-8039 Zurich.

Brammer, H. (2010). Examination into the Reliability of Secondary Water Supplies. Fire Engineering Research Report 10/10. University of Canterbury.

Budnick, E.K. (2001). Automatic Sprinkler System Reliability. Fire Protection Engineering. Winter 2001. Issue 9, pp. 7-12.

Chow, W.K. (2005). On Estimating Heat Release Rate for a Design Fire in Sprinkler Protected Area. Proceedings of 2005 Asia-Pacific Conference on Risk-Management and Safety. 1-2 December 2005. Hong Kong, pp. 121-129.

CIB (International Council for Building Research Studies and Documentation) (1983). Design guide - structural fire safety. Report of CIB W14 Workshop, Rotterdam, Netherlands. Fire Safety Journal. Vol. 10. Issue 2, pp. 77 - 137.

Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset (2003). SFS-EN 1991-1-2. Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Feeney, M. (2001) Accounting for Sprinkler Effectiveness in Performance Based Design of Steel Buildings for Fire. Fire Engineering Research Report 01/12. University of Canterbury.

Finucane, M., Pickney, D. (1989). Reliability of Fire Protection and Detection Systems. United Kingdom Atomic Energy Authority. University of Edinburgh, Scotland.

Fire protection – Automatic sprinkler systems – Part 1: Requirements and test methods for sprinklers (2004). ISO 6182-1. International Organization for Standardization.

Frank, K.M. (2013). Fire Safety System Effectiveness for a Risk-Informed Design Tool. University of Canterbury.

Frank, K.M., Gravestock, N., Spearpoint, M., Fleischmann, C. (2013). A review of sprinkler system effectiveness studies. Fire Science Reviews. Vol. 2. Issue 1. Article 6.

Frank, K.M., Spearpoint, M. (2012). Uncertainty in Estimating the Fire Control Effectiveness of Sprinklers from New Zealand Fire Incident Reports. Fire Technology 50 (2014), pp. 611-632.

Hadjisophocleous, G., Zalok, E. (2003). A Survey of Fire Loads in Commercial Premises. 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Northern Ireland.

Hall, J.R. Jr. (2006). An analysis of automatic sprinkler system reliability using current data. National Fire Protection Association.

Hall, J.R. Jr. (2007). New statistics of sprinkler reliability and performance. National Fire Protection Association.

Hall, J.R. Jr. (2013). U.S. Experience with sprinklers. National Fire Protection Association.

Hall, J.R. Jr. (2010). U.S. Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment. National Fire Protection Association.

Hauptmanns, U., Marx, M., Grünbeck S. (2008). Availability analysis for a fixed wet sprinkler system. Fire Safety Journal 43 (2008), pp. 468-476.

Hietaniemi, J. (2016). Kauppakeskuksen palokuorman palamisen mallintaminen. Luottamuksellinen lähde.

Hiipakka, M. (2010). Vähittäistavaraliikkeiden palokuormien inventaariotutkimus. Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Hööpakka, J. (2010). Liikerakennusten palokuormien inventaariotutkimus. Erikoistavaraliikkeet. Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Juneja, C.S. (2004). Analysis of Ontario fires and reliability of active fire protection systems. Carleton University. Ottawa, Ontario.

Kelly, K.J. (2003). Trade Ups. Sprinkler Quarterly. Summer 2003.

Keski-Rahkonen, O., Karhula, T., Sikanen, T., Hostikka, S. (2011). Palokuolemien ehkäisykeinojen arviointiohjelma pilottina tulevaisuuteen. Palotutkimuksen päivät 2011. Espoo 23.-24.8.2011. Pelastustieto, palontorjuntatekniikka –erikoisnumero. Palo- ja pelastustieto ry (2011), pp. 22-25.

Kiinteät palonsammutusjärjestelmät. Automaattiset sprinklerilaitteistot. Suunnittelu, asennus ja huolto (2009). SFS-EN 12845 + A2. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Kirchner, U. (1996). BVFA & VdS.

Kokkala, M. (1997). Sprinkler Statistics for Finland. VTT.

Kook, K.W. (1990). Exterior Fire Propagation in a High-Rise Building. Worcester Polytechnic Institute.

Lessons of a high-rise fire (1976). Fire International. Vol. 5. Issue 51, pp. 59-64

Linder, K.W. (1993). Field reliability of fire detection systems. NIST 5264: Balanced Design Concepts Workshop. National Institute of Standards and Technology.

Maankäyttö- ja rakennuslaki (2012). 17 luku – Rakentamisen yleiset edellytykset. 117 b § Paloturvallisuus (21.12.2012/958). Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L17P117b>

Madrzykowski, D., Walton, W. D. (2010). Impact of Sprinklers on the Fire Hazard in Dormitories: Sleeping Room Fire Experiments. NIST TN 1658.

Malm, D., Pettersson, A. (2008). Reliability of Automatic Sprinkler Systems – an Analysis of Available Statistics. Lund University.

Maksimovic, T. (2011). Data on reliability of sprinkler systems. Vilnius Gediminas Technical University.

Marryatt, H.W. (1988). Fire: A Century of Automatic Sprinkler Protection in Australia and New Zealand, 1886-1986. Australian Fire Protection Association.

Marsh (2008). Effectiveness of Fire Safety Systems for Use in Quantitative Risk Assessments. New Zealand Fire Service Commission.

Maurice Jones, A. Jr. (2008). Fire Protection Systems. Cengage Learning.

Maybee, W.W. (1988). Summary of Fire Protection Programs in the U.S. Department of Energy—Calendar Year 1987. U.S. Department of Energy.

- Miller, M.J. (1974). Reliability of Fire Protection Systems. Loss Prevention ACEP Technical Manual 8.
- Milne, W.D. (1959). Automatic Sprinkler Protection Record. Factors in Special Fire Risk Analysis. Chapter 9, pp. 73-89.
- Moelling, D.S., Sideris, A.G., and Hockenbury, R.W. (1980). Reliability of Fire Protection Systems in Nuclear Plants. Thermal Reactor Safety, in Proceedings of the American Nuclear Society/European Nuclear Society Topical Meeting. Knoxville, TN. April 6-9.
- Moinuddin, K., Thomas, I., Chea, S. (2008) Estimating the Reliability of Sprinkler Systems in Australian High-rise Office Buildings. Centre for Environmental Safety and Risk Engineering.
- Nash, P., Young, R.A. (1991). Automatic Sprinkler Systems for Fire Protection, 2nd edn. Paramount Publishing Limited.
- NFPA (1970). Automatic Sprinkler Performance Tables, 1970 Edition. Fire Journal. July 1970, pp. 35-39.
- OREDA (2002). Offshore Reliability Data Handbook, 4th Edition. OREDA Participants.
- Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy (2017). Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnitelma puurakenteiden hiiltymästä ja suojauksesta. Luottamuksellinen lähde.
- Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy (2015). Puukerrostalon palosuunnitteluohje – toiminnallinen suunnittelu. Finnish Wood Research Oy.
- Paloturvallisuussuunnittelu. Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit (2003). RIL 221-2003. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.
- Perustelumuihistio ympäristöministeriön asetukseen rakeenusten paloturvallisuudesta (2017). Ympäristöministeriö.
- Poon, L. (2013). Assessing the reliance of sprinklers for active protection of structures. The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. Procedia Engineering 62 (2013), pp. 618-628.
- Powers, W.R. (1979). Sprinkler experience in high-rise buildings. Society of Fire Protection Engineers.
- PRONTO (2017). Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto. Saatavissa (viitattu 22.9.2017): <https://prontonet.fi/>

Richardson, J. K. (1985). The Reliability of Automatic Sprinkler Systems. Canadian Building Digest. Vol. 238.

Rönty, V., Keski-Rahkonen, O., Hassinen, J. (2004). Reliability of sprinkler systems. Exploration and analysis of data from nuclear and non-nuclear installations. VTT Working Papers 15.

Sakenaite, J. (2009). The Problem of Sprinkler Reliability. Science – Future of Lithuania. Vol. 1. Issue 5.

Schultz, R. (2005). Fire Protection – The NIST WTC Investigation Fire Report. Plumbing Engineer. July 2005.

Smith, F. (1983). How Successful are Sprinklers. SFPE Bulletin. Vol. 83-2. April 1983, pp 23-25.

Solomon, R.E. (1997). Automatic Sprinkler Systems. Fire Protection Handbook, 18th Edition. National Fire Protection Association.

Sprinklerilaitteiston kunnossapito-ohjelman laadintaohjeet (2007). Finanssialan Keskusliitto.

Sprinklerilaitteistot (2010). RT 63-10990. Rakennustieto Oy.

Sprinklerilaitteistot. Suunnittelu ja asentaminen (2007). CEA 4001:2007 – 06 (fi). Omaisuusvakuutuskomitea.

Taylor, K.T. (1990). Office building fires... A case for automatic fire protection. Fire Journal. Vol. 84. Issue 1.

Thauvoye, C. (2007). Etude Statistique sur les Charges Calorifiques: Traitement des Enquêtes. French Report A10-G4-T4-RF-ETUDE-STATISTIQUE-SUR-LES-CHARGES-CALORIFIQUES, 55 p.

Thayvoye, C., Zhao, B., Klein, J., Fontana, M. (2008). Fire load survey and statistical analysis. Fire safety science – Proceedings of the 9th international symposium 991–1002, IAFSS.

Tillander, K., Oksanen, T., Kokki, E. (2009). Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. VTT Tiedotteita – Research Notes 2479.

Triangle Fire Systems (2016). Fire sprinkler systems: a guide to designs, colour codes and suppliers. IFSEC Global, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.8.2017): <https://www.ifsecglobal.com/types-fire-sprinkler-systems-designs-colour-codes-suppliers/>

Tryon, G.H., McKinnon, G.P. (1969). Fire Protection Handbook, 13th edn. National Fire Protection Association.

US Department of Energy (2004). Summary of fire protection programs for calendar year 2004. US Department of Energy.

VK003 - Micromatic Standard Response Pendent Sprinkler (K2.8) (2018). The Viking Corporation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.2.2018): <http://www.vikingcorp.com/vk003-micromatic-standard-response-pendent-sprinkler-k28>

Watanabe, A. (1979). Effectiveness of Active Fire Protection Systems. Systems Approach to Fire Safety in Buildings. CIB Symposium. Vol 2, pp. 1–11

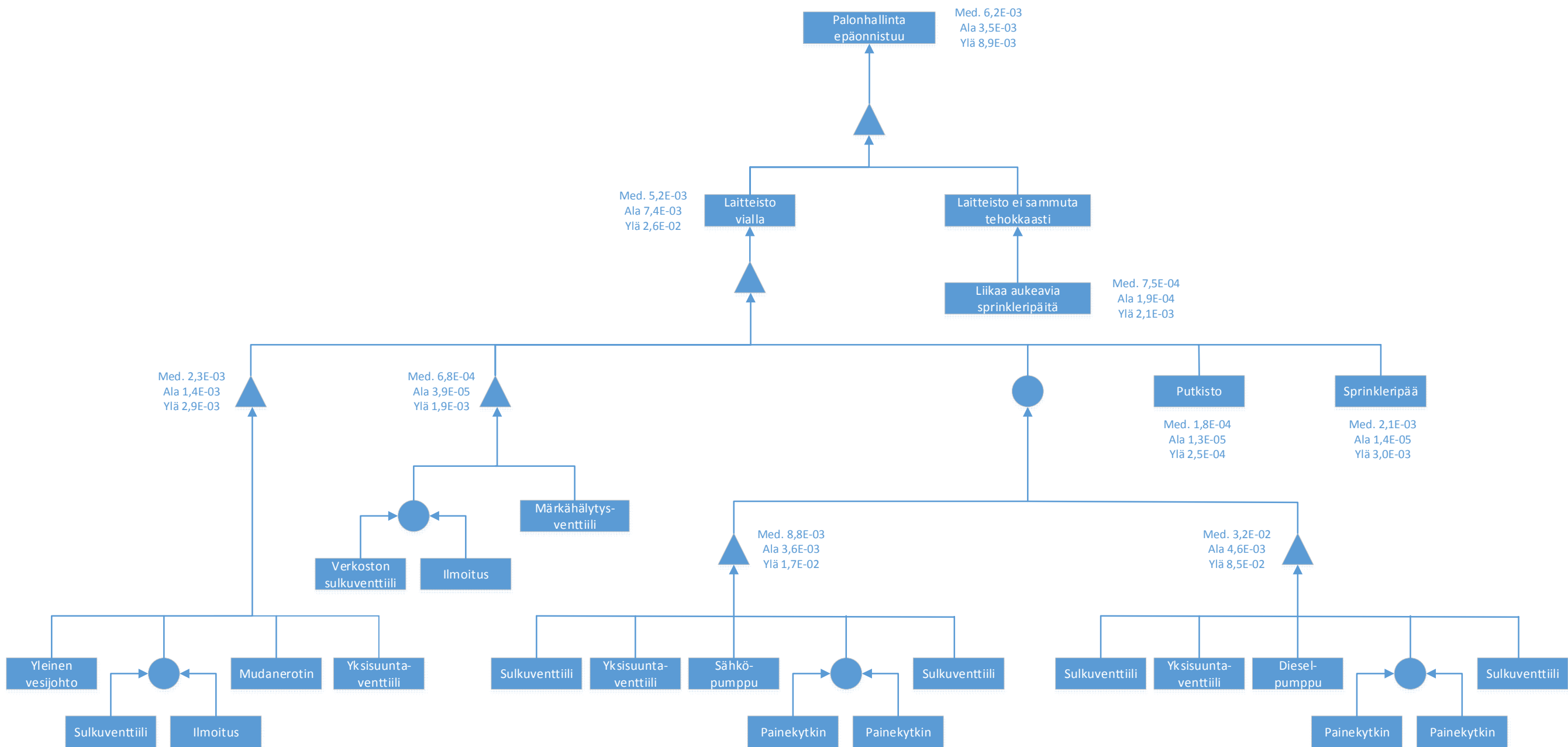
Wright, D. (2017). “Easy” Excel Inverse Triangular Distribution for Monte Carlo Simulations. Saatavissa (viitattu 5.12.2017): <http://www.drdawnwright.com/?p=17101>

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta (2017). 848/2017. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus

Zalok, E., Hadjisophocleous, G.V., Mehaffey, J.R. (2009). Fire loads in commercial premises. Fire and Materials. Vol. 33, pp. 63 – 78.

Zhuykov, S., Dowling, V. (2005). Maintenance Testing of Sprinkler Heads: Qualitative Analysis Causes of Failures. CSIRO.

LIITE A: PUUKERROSTALON SPRINKLERILAITTEISTON VIKAPUU



LIITE B: KAUPPAKESKUKSEN SPRINKLERILAITTEISTON VIKAPUU

